



## **Demonstrationsanlæg til blødgøring af drikkevand**

Fyrtårnsprojekt "Fremtidens Drikkevandsforsyning" Arbejdspakke 5

**Larsen, Sille Lyster; Hedegaard, Mathilde Jørgensen; Lopato, Laure ; Dollerup Nielsen, Ole; Juul, Henrik; Albrechtsen, Hans-Jørgen**

*Publication date:*  
2016

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Larsen, S. L., Hedegaard, M. J., Lopato, L., Dollerup Nielsen, O., Juul, H., & Albrechtsen, H-J. (2016). *Demonstrationsanlæg til blødgøring af drikkevand: Fyrtårnsprojekt "Fremtidens Drikkevandsforsyning" Arbejdspakke 5*. Miljøstyrelsen,.

---

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Demonstrationsanlæg til blødgøring af drikkevand

Fyrtårnsprojekt "Fremtidens Drikkevandsforsyning"

Arbejdspakke 5

2016



Miljø- og Fødevareministeriet  
Naturstyrelsen



**Titel:**

Demonstrationsanlæg til blødgøring af drikkevand

**Forfattere:**

Sille Lyster Larsen  
Mathilde J. Hedegaard  
Laure Lopato  
Ole Dollerup Nielsen  
Henrik Juul  
Hans-Jørgen Albrechtsen

**Udgiver:**

Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K  
www.mst.dk

**Foto:**

Forfatterne

**Illustration:**

Forfatterne

**År:**

2016 juni

**Kort:**

-

**ISBN nr.**

[xxxxxx]

**Ansvarsfraskrivelse:**

Miljøministeriet offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøministeriet. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøministeriets synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøministeriet finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik. Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

<b>Indhold.....</b>	<b>3</b>
<b>Forord .....</b>	<b>5</b>
<b>Konklusion og sammenfatning.....</b>	<b>6</b>
<b>Summary .....</b>	<b>8</b>
<b>1. Indledning.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Pilotanlægget .....</b>	<b>13</b>
2.1 Opbygning.....	13
2.2 Drift .....	14
<b>3. Forsøg og forsøgsperiode .....</b>	<b>16</b>
<b>4. Materialer og metode .....</b>	<b>17</b>
4.1 Vandprøver.....	17
4.2 Pelletprøver .....	17
4.3 Yderligere forsøg.....	17
<b>5. Teknisk erfaringsopsamling.....</b>	<b>19</b>
5.1 Dosering af sand .....	19
5.2 Opstart af pilotanlæg .....	20
5.3 Transport og opsætning af pilotanlæg .....	20
5.4 Sikkerhed .....	20
5.5 Andet .....	21
<b>6. Blødgøring af vand .....</b>	<b>22</b>
<b>7. Fjernelse af makroioner, spormetaller og BAM.....</b>	<b>24</b>
7.1 Makroioner (Na, Fe, Mn, P, K) .....	24
7.2 Fluorid .....	26
7.3 Spormetaller (Li, Al, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Sn, Tl, Pb) .....	26
7.4 Arsen.....	29
7.5 Pesticid (BAM) .....	30
<b>8. Pellets .....</b>	<b>31</b>
8.1 Udvikling over tid .....	31
8.2 Indhold af pellets .....	33
8.3 SEM af pellets .....	34
<b>9. Alternative blødgøringsmetoder.....</b>	<b>36</b>
<b>10. Blødgøring som hygiejnisk barriere .....</b>	<b>37</b>
<b>11. Design af fuldskala-anlæg .....</b>	<b>38</b>

11.1	Sand.....	38
11.2	Pellets .....	38
11.3	NaOH.....	38
11.4	Drift af anlæg .....	39
11.5	Belægninger .....	39
11.6	Rengøring af pelletreaktoren.....	39
11.7	Elementer som skal inkluderes i et fuldskala-anlæg.....	39
<b>12.</b>	<b>Konklusion.....</b>	<b>40</b>
<b>13.</b>	<b>Perspektivering.....</b>	<b>42</b>
13.1	Forretningsplan .....	42
13.2	Forretningsmuligheder.....	42
13.3	Formidlingsaktiviteter .....	42
	<b>Referencer.....</b>	<b>44</b>
 <b>Rapport med appendiks 1-9</b>		
	<b>Appendiks 1: Forsøg med blødgøringskolonne på Brøndbyvester vandværk.....</b>	<b>5</b>
	<b>Appendiks 2: Forsøg med blødgøringskolonne på Værket ved Søndersø.....</b>	<b>44</b>
	<b>Appendiks 3: Forsøg med blødgøringskolonne på Dalumværket .....</b>	<b>63</b>
	<b>Appendiks 4: Afrensningsforsøg af pelletkolonne med citronsyre .....</b>	<b>78</b>
	<b>Appendiks 5: Reduktion af kalkudfældning i varmt brugsvand.....</b>	<b>83</b>
	<b>Appendiks 6: forsøg med blødgøringskolonne på Lindvedværket .....</b>	<b>96</b>
	<b>Appendiks 7: Blødgøringsproces som hygiejnisk barriere .....</b>	<b>109</b>
	<b>Appendiks 8: Arsenfjernelse ved pelletsoftening.....</b>	<b>120</b>
	<b>Appendiks 9: Overfladers modstandsdygtighed over for kalkbelægning .....</b>	<b>125</b>

# Forord

# FutureWater

Denne rapport er udarbejdet på baggrund af fyrtårnsprojektet "Fremtidens drikkevandsforsyning", der er finansieret af VTU-fonden og Miljøministeriets pulje for grøn teknologi. Projektet er udført som et samarbejde mellem DTU Miljø, HOFOR A/S og VandCenter Syd A/S, i perioden februar 2014 til december 2015.

## Projektgruppe:

DTU Miljø

Sille Lyster Larsen

Mathilde J. Hedegaard

Sune Ryssel

Óluva K. Vang

Hans-Jørgen Albrechtsen

HOFOR A/S

Laure Lopato

Jesper Elkjær

Søren Lind

VandCenter Syd A/S

Henrik Juul

Ole Dollerup Nielsen

Henrik Holst

# Konklusion og sammenfatning

Grundvand i Østdanmark er generelt hårdt, og kalkaflejringer i varmtvandssystemer, husholdningsapparater og rørinstallationer i huse resulterer i gener og udgifter for forbrugeren. Gennem de seneste år er interessen for at etablere centrale blødgøringsanlæg på danske vandværker steget. Det forventes, at blødgøring vil medføre betydelige energibesparelser og miljømæssige fordele i form af reduktion af forbrugernes udgifter til vaskemiddel og generel drift og vedligehold af husholdningsapparater og varmtvandssystemer.

I den anledning blev det undersøgt, om central blødgøring ved hjælp af pelletreaktormetoden kan anvendes til at behandle drikkevand på danske vandværker. I løbet af projektperioden fra februar 2014 til december 2015 blev et pilotanlæg for central blødgøring af drikkevand opstillet ved fire forskellige vandværker i Danmark og afprøvet på syv forskellige vandtyper, herunder både anaerobt råvand og færdigbehandlet drikkevand. Disse vandværker omfattede Brøndbyvester vandværk og Værket ved Sønder sø under HOFOR og Dalumværket og Lindvedværket under VandCenter Syd (VCS). Formålet var at undersøge funktionaliteten af anlægget og hvorledes blødgøring påvirker vandkvaliteten. Derudover var formålet at øge viden og kendskab til implementering og drift af anlægget for at kunne designe et fremtidigt fuldskala-anlæg.

Blødgøring ved hjælp af pelletreaktormetoden indbefatter udfældning af vands indhold af calciumcarbonat på fint sand, ved tilsætning af natronlud (NaOH), hvorved såkaldte pellets dannes. De calciumcarbonat-dækkede pellets har højere densitet end vand og falder til bunds i pelletreaktoren, hvor de fjernes og erstattes af nyt sand. Efter blødgøring pH-justeres vandet ved tilsætning af CO<sub>2</sub>, og vandet pumpes herefter videre til det biologiske sandfilter.

Forsøgene viste, at pilotanlægget uden problemer kunne transporteres og installeres på vandværker rundt omkring i Danmark og forsøgene gav viden og erfaringer om drift af anlægget, og fordele og ulemper ved opsætningen, som vil være afgørende for at optimere designet af et fremtidigt fuldskala-anlæg. På Lindvedværket var der problemer med længere nedetider på grund af lille sandkornstørrelse og et meget stort indhold af fines, hvilket resulterede i, at pelletreaktoren skulle køres ved lavt flow. Det anbefales derfor at benytte velsorteret sand af den rette størrelse (~0,3 mm) og at si eller vaske sandet før tilsætning, for at reducere skylletiden ved opstart og for at fjerne det fine støv, der kan ende med at blokere sandfilteret.

Erfaringer fra Holland viser, at for visse vandtyper kan det være et problem at danne pellets, så der i stedet dannes flager, der er vanskelige at håndtere. Derfor var det et formål at afklare om pelletreaktoren kunne fungere med de undersøgte vandtyper. På intet tidspunkt skete udfældningen i flager. Koncentrationen af jern i det undersøgte vand var dog ikke over 3 mg Fe/L, som angivet at være problematisk for pelletdannelse, og risikoen for flagedannelse ved pelletreaktormetoden ved anvendelse på andre vandkvaliteter kan derfor ikke fuldstændigt udelukkes.

Undersøgelserne viste, at pelletreaktormetoden var effektiv til at blødgøre hårdt dansk grundvand med op til 71 % og reducerede hårdheden fra 18-24 °dH til 4-8 °dH, det vil sige til vandkvaliteter, der klassificeres som enten blødt (5,6-7 °dH) til middelhårdt (8,2-9,5 °dH). Blødgøring af hårdt indløbsvand var ydermere stabil ganske kort tid efter opstart, og det er derfor en metode, der kan tages i brug kort tid efter installation.

Derudover reducerede pelletreaktormetoden koncentrationen af en række metaller i vandet, som det er hensigtsmæssigt at reducere, så som jern og mangan. Ved behandling af anaerobt råvand blev jern og mangan reduceret med henholdsvis 69-91 % og 96-98 %, og blødgøring af anaerobt råvand på danske vandværker vil derfor radikalt ændre den traditionelle behandling af drikkevand. For vandværker med forekomster af fx arsen, som ikke fjernes ved blødgøring, er det vigtigt at være opmærksom på det reducerede indhold af jern og mangan og derved den reducerede evne til at tilbageholde tungmetaller som arsen.

Af grundstoffer, som ønskes fjernet, skal særligt nævnes nikkel og arsen. Nikkel blev i gennemsnit fjernet med 41 % uafhængigt af vandtype og indløbskoncentration. Arsen derimod, blev ikke fjernet i pelletreaktoren.

Flere stoffer ønsker man ikke fjernet i blødgøringsprocessen, da de kan have positiv indvirkning på menneskers sundhed eller den efterfølgende vandbehandling. Magnesium og lithium er metaller, der har en positiv indvirkning på menneskers helbred, og disse metaller blev ikke fjernet fra vandet ved blødgøring på nogen af de fire vandværker. Kobber bidrager til at stimulere nitrifikation og ammoniumfjernelse i biologiske sandfiltre og skal derfor heller ikke fjernes ved blødgøring, hvilket heller ikke var tilfældet.

Der er en øvre grænse for indholdet af fluorid i drikkevand, da forhøjede koncentrationer kan forårsage dental- og skeletal fluorose. Samtidig beskytter fluorid i begrænsede mængder mod huller i tænderne, og det er derfor ikke ønskeligt at fjerne fluorid fra vandet. Fjernelse af fluorid blev derfor undersøgt på Dalumværket og Lindvedværket, og fluorid blev fjernet med henholdsvis 31 og 13 %, men den totale mængde, der blev fjernet fra vandet, var den samme fra de to vandværker (0,056-0,072 mg/L).

Pellets fra pelletreaktoren blev undersøgt for indhold af aflejrrede metaller, for at afdække muligheden for at benytte pellets som biprodukt som fx jordforbedringsmiddel, i stedet for at klassificere pellets som affaldsprodukt. Dette var især med fokus på aflejring af tungmetallerne cadmium, krom, nikkel, bly og arsen i pellets. Resultaterne viste, at indholdet af nævnte tungmetaller i pellets fra de fire vandværker alle overholdt de fremtidige grænseværdier opstillet af Center for Kontrol, NaturErhvervstyrelsen. Der kan derfor i fremtiden være mulighed for at benytte biproduktet fra blødgøringsprocessen som jordforbedringsmiddel i haver og landbrug.

Der blev yderligere lavet et forsøg med fjernelse af et pesticidnedbrydningsprodukt BAM, og her havde blødgøring ingen indvirkning. Blødgøring som hygiejnisk barriere blev også undersøgt for at undersøge om tilsætning af base i blødgøringsprocessen reducerede tilsatte mikroorganismer. Generelt blev koncentrationen af undersøgte mikroorganismer reduceret i blødgøringsprocessen, men ikke nok til, at pelletreaktoren udgjorde en væsentlig hygiejnisk barriere for potentielle forureninger.

Alternative behandlingsmetoder, såsom ultralydsbehandling af vand og vandbehandling med elektrisk felt viste, at der blev aflejret lige så meget kalk i varmtvandsbeholderen for vand behandlet ved disse metoder som for ubehandlet drikkevand. For vand behandlet ved pelletreaktormetoden derimod, blev mængden af aflejret kalk reduceret med 99 %, og pelletreaktormetoden er således den bedste af de undersøgte metoder til at reducere udfældning af kalk i vandvarmere og på overflader.

Forskellige overfladematerialer blev undersøgt for deres egenskaber til at modstå kalkaflejringer og dette viste, at PG 28 var det mest interessante overflademateriale at arbejde videre med. Desuden blev det vurderet ved analyse, at afrensning af kalkaflejringer på pelletreaktoren kan udføres med citronsyre, men at den eksakte dosering bør vurderes yderligere.



# Summary

Groundwater is generally hard in the Eastern part of Denmark, and scaling in hot water systems, household equipment and pipes in household installations caused by the hard water is inconvenient and costly for the consumers. This has over the last years increased the interest in establishing centralized softening at Danish water works. Softening is expected to result in substantial energy savings, environmental benefits and savings in consumers cost to e.g. washing powder, general management and maintenance of household equipment and hot water systems.

At this background it was investigated if centralized softening by the pellet reactor method can treat drinking water at Danish waterworks. During the project period from February 2014 to December 2015 a pilot plan for centralized softening of drinking water was established at four different water works in Denmark and tested with seven different water types, including anaerobic raw water and treated drinking water. The water works included Brøndbyvester Waterworks and Søndersø Waterworks, both at HOFOR, Dalum Waterworks and Lindved Waterworks, both at VandCenterSyd (VCS). The purpose was to increase the knowledge and experience with implementation and management of the plant with the purpose to design a future full scale plant.

Softening of water by the pellet reactor method includes an increase of the pH level by addition of sodium hydroxide (NaOH) which leads to precipitation of calcium carbonate from the water on fine grained sand, forming pellets. The pellets of calcium carbonate have a higher density than water and precipitate to the bottom of the pellet reactor where they are removed, and new sand is added. After softening pH in the water is adjusted by adding CO<sub>2</sub>, and the water is lead further on to the biological sand filters.

The experiments showed that the pilot plant could easily be transported and installed at waterworks around Denmark, and the experiments gave knowledge and experience on the management of the plant, as well as advantages and disadvantages by the setup, valuable for optimized design of future full scale plants. At Lindved Waterworks, small sand size and a very high content of fines required a low flow in the column and caused downtimes of the plant. It is therefore recommended to use sand of the optimum size (~ 0.3 mm) and sieve or wash the sand before use, to reduce the rinsing time, and thereby remove the fine dust that can end up blocking the sand filters in the following process.

Dutch experiences show that pellet formation can be difficult for certain water types, instead flakes are formed which are difficult to handle. It was therefore a goal to investigate if the pellet reactor can work with the investigated water types. Flakes were not formed with any of the investigated water types. However, the iron concentration in the water did not exceed the guideline of 3 mgFe/L, which is considered as problematic for pellet formation, and the risk of flake formation in the pellet reactor with other water qualities cannot be excluded.

With the pellet reactor method it was possible to soften hard Danish groundwater, with up to 71% and achieve water classified as soft (4-8 ° dH). Softening of hard water inlet was furthermore stable a short time after start-up, and the method can therefore be used shortly after installation.

Furthermore, the pellet reactor reduced the concentration of a range of metals in the water, which are beneficial to remove, such as iron and manganese. In anaerobic raw water iron and manganese was reduced by respectively 69-91% and 96-98%, and softening of anaerobic raw water on the Danish

waterworks will consequently radically change the traditional treatment of drinking water. For raw water sources containing arsenic (which are not removed by softening) it is important for the process engineers to pay attention to the reduced content of iron and manganese and thus reduced ability to retain semi-metals such as arsenic.

Elements which are desired removed, include nickel and arsenic. Nickel was removed on average by 41% independent of the type and water inlet concentration. Arsenic other hand, were not removed by softening.

Several metals are preferred not to be removed in the softening process, since they can have positive effects on human health or the following water treatment. Magnesium and lithium are metals that are considered to have a positive impact on human health with respect to cardiovascular diseases and mental health. Across the four waterworks neither magnesium nor lithium was removed from the water by the softening process. Copper can stimulate the nitrification of ammonia in biological sand filter and should therefore not be removed in the process, and no removal was observed. The content of fluoride in the drinking water has an upper guideline value limit since elevated concentrations can cause dental and skeletal fluorosis. At the same time fluoride protects against tooth decay in limited quantities and therefore it is not desirable to remove all fluoride from the water. Removal of fluoride was therefore examined at Dalum Waterworks and Lindved Waterworks and fluoride was removed with 31 and 13% but the total amount removed was fairly uniform in the two water treatment plants.

Pellets from the reactor were examined for content of deposited metals in order to use pellets as chalk on farmland. The study was especially focused on the deposition of heavy metals cadmium, chromium, nickel, lead and arsenic in pellets. The results showed that the contents of these heavy metals in pellets from the four water treatment plants all complied with the future limit values set by the Center for Kontrol, NaturErhvervsstyrelsen. In future it is therefore a possibility to use the byproduct from the softening process as soil improver in gardening and agriculture.

An investigation of removal of the pesticide BAM (2,6 dichlorobenzamide) during softening showed no effect. Softening as a hygienic barrier was also studied with respect to the effect on added microorganisms by adding base (NaOH) during the softening and, in general, the concentration of microorganisms examined was reduced during softening but not enough to consider the pellet reactor as a substantial hygienic barrier for potential contaminants.

Alternative treatments, such as ultrasound treatment of water and water treatment by electric field were also examined and the result was that equally amounts of scaling were deposited in the water heater with water treated by these "alternative" methods as with untreated drinking water. On the other hand, water treated by the pellet reactor method reduced the amount of deposited calcium by 99%, and the pellet reactor is thus the most efficient of the investigated methods to reduce the scaling in water heaters and on surfaces.

Since uncontrolled scaling in the reactor is one of the major operational challenges in the reactor, various surface materials were tested for their properties to resist scale deposits. The study showed that P628 was the most interesting surface material for further investigations. Cleaning of the column by means of a weak / medium strong acid such as citric acid was studied since the management of the citric acid is more desirable in an OHS perspective, and is less corrosive to metals such as stainless steel and brass. The conclusion was that the removal of calcium deposits in the reactor with citric acid was a success, but that the exact dosage and contact time should be investigated further.

The number of tests in the pilot plant has provided grossly improved insight into the operation of softening facilities and has increased the knowledge of the effect on the raw water. The experience will be actively used to optimize the process when deploying full-scale plants. The project has

simultaneously contributed to an increased focus of the softening of drinking water, particularly among the water utilities involved, HOFOR and VCS Denmark.

# 1. Indledning

Drikkevand i Danmark er typisk produceret fra anaerobt grundvand rigt på jern og mangan med en hårdhed på 5-30 °dH (GEUS, 2015). Drikkevand i Danmark behandles normalt ved beluftning efterfulgt af filtrering i biologiske sandfiltre. Interessen for at etablere et centralt blødgøringsanlæg på danske vandværker er steget de seneste par år og interessen kommer ikke kun fra vandforsyningssektoren, men også fra forbrugere, industri og lovgivere. Der kan opnås betydelige energibesparelser og miljømæssige fordele, samt fordele for forbrugerne i form af reduceret sæbe- og energiforbrug, øget levetid på husholdningsapparater og rørinstallationer i huse. Desuden vil blødgøring af drikkevand gøre hverdagen lettere for forbrugeren, der ikke vil være nødsaget til at afkalke apparater, vandhaner osv. i samme omfang som i dag.

I 2011 etablerede HOFOR et avanceret pilotanlæg til afprøvning af pelletreaktor-metoden på anaerobt råvand på Værket ved Marbjerg. Pelletreaktoren fjernede store dele af det naturlige jern- og manganindhold i grundvandet, hvilket kan hjælpe til at reducere belastningen på sandfiltre, hvor jern og mangan normalt fjernes fra råvandet. Desuden reduceres mængden af slam produceret under returskylning. Der blev samtidig observeret en reduktion af nikkelkoncentrationen i råvandet, hvilket er yderst relevant for vandværker, der opererer med nikkelforurenet grundvand, da nikkel ikke altid fjernes tilstrækkeligt ved normal sandfiltrering.

Udover disse forsøg og forsøg i 1998 med pelletreaktor og nanofiltrering udført af VCS, har dansk vandforsyning generelt meget lille erfaring med blødgøring af drikkevand, og det er derfor relevant med et pilotanlæg for at undersøge mulighederne for blødgøring af vand på danske vandværker, samt for at dokumentere processens effektivitet.

Som en del af projektet "Fremtidens Drikkevandsforsyning" blev pilotanlægget for central blødgøring af drikkevand, udviklet af HOFOR, opstillet ved fire forskellige vandværker i Danmark med forskellige råvandstyper, for at indsamle data for hvorledes blødgøring påvirker vandkvaliteten på vandværker i Danmark.

Pilotanlægget blev sat op og testet på følgende fire vandværker:

Brøndbyvester Vandværk (HOFOR)

Værket ved Søndersø (HOFOR)

Dalumværket (VCS)

Lindvedværket (VCS)

Brøndbyvester vandværk og Værket ved Søndersø blev udvalgt, da vandværkerne i en nær fremtid skulle renoveres med mulighed for etablering af et blødgøringsanlæg. På grund af den høje koncentration af jern i vandet på Værket ved Søndersø (~2,7 mg Fe/L) var der særligt fokus på pelletproduktionen, da erfaringer fra Holland indikerer, at høje koncentrationer af jern (>3 gm Fe/L) i indløbsvandet kan medføre udfældning af pellets, der ikke er runde, men derimod en udfældning i flager. I Brøndbyvester har råvandet et højt indhold af nikkel, og der var derfor fokus på, hvorledes indholdet af nikkel blev påvirket af blødgøringsprocessen.

I forbindelse med etablering af et nyt Universitetshospital i Odense er VCS blevet forespurgt, om Dalumværket, der leverer vand til hospitalet, vil være i stand til at levere blødt vand (8-10 °dH).

Pelletreaktoren blev i den anledning testet på Dalumværket. Til sidst blev pilotanlægget flyttet til

Lindvedværket, hvor koncentrationen af arsen i råvandet er høj. Forsøget skulle hjælpe med at undersøge muligheden for arsen-fjernelse under blødgøringsprocessen.

Det samlede formål med WP5 under Fremtidens Drikkevandsforsyning var derfor:

- At bygge et pilotanlæg og undersøge dets funktionalitet, med henblik på at dimensionere fremtidige blødgøringsanlæg på danske vandværker
- At undersøge og forstå effekten af blødgøring på vandets bestanddele og kvalitet, med fokus på makroioner og spormetaller
- At skabe opmærksomhed og know-how om blødgøring af drikkevand ude hos de danske vandforsyninger

Projektet er et samarbejde mellem HOFOR, VCS og DTU Miljø. Fremover forventes pilotanlægget at kunne lejes ud til andre vandværker, der er interesserede i at undersøge muligheden for blødgøring ved hjælp af en pelletreaktor.

## 2. Pilotanlægget

### 2.1 Opbygning

Pilotanlægget består af en pelletreaktor og et sandfilter, og er opbygget af tre containere, der kan transporteres rundt med lastbil.

Pelletreaktoren er cylindrisk med en indre diameter på 9,94 cm og en højde på 6,66 m.



**Figur 1** Skitse af pelletreaktoren opsat på vandværket og billeder af pelletreaktoren (Foto: Laure Lopato)

Pelletreaktoren fyldes delvist med sand (0,3-0,5 mm i diameter) og vand pumpes ind i pelletreaktoren nedefra med en hastighed på mellem 45 og 107 m pr. time for at holde sandet i pelletreaktoren suspenderet.

En stærk base, i dette tilfælde natronlud (NaOH 27,65%), pumpes sammen med indløbsvandet ind i pelletreaktoren og med pH-forøgelsen og de rette flowforhold udfældes calciumcarbonat på sandkornene. De calciumcarbonat-dækkede pellets er tungere og falder til bunden af pelletreaktoren, hvor de fjernes og erstattes med nyt sand. Efter vandet har passeret igennem pelletreaktoren, pH-justeres vandet ved tilsætning af CO<sub>2</sub> og vandet pumpes herefter videre til iltning og sandfilteret (Figur 1).

## 2.2 Drift

Til opstart af pelletreaktoren blev der hældt 1,5-2 sække sand à 25 kg i pelletreaktoren, så der var ca. 1,5-2 m sand. Nyt sand blev tilsat ved hjælp af en kop fra toppen af pelletreaktoren. Tilsætning af sand svarede til 3-5 % af den tørrede vægt af de pellets, der fjernes fra pelletreaktoren. Dette skete generelt én gang om ugen. Pellets kan udtages afhængig af pelletstanden i pelletreaktoren, men tre gange om ugen var praktisk muligt med hensyn til mandskab og tidsforbrug. Pellets blev udtaget fra bunden af pelletreaktoren. Afhængig af pelletstanden i reaktoren blev der i alt udtaget 12-25 L pellets pr. uge. Natronlud blev tilsat kontinuert via en dyse fra bunden af pelletreaktoren ved hjælp af en doseringspumpe og blev doseret afhængigt af flow i pelletreaktoren.

Tabel 1 giver et overblik over flowforhold, opholdstid, tilsætning af natronlud og produktion af pellets ved blødgøring af råvand og færdigbehandlet drikkevand på de fire vandværker:

**Tabel 1** Kontinuert flow igennem pelletreaktoren, opholdstid og tilsætning af natronlud ved blødgøring af råvand og færdigbehandlet drikkevand på Brøndbyvester vandværk, Værket ved Søndersø, Dalumværket og Lindvedværket. Hver tredje dag blev der tappet pellets fra pelletreaktoren og den tørrede vægt af pellets er angivet.

Vandtype	flow (l/t)	Opholdstid (min)	NaOH (mg/l)	Aftappede pellets hver 3. dag, tørret (kg)
Brøndbyvester, råvand	600	5,2	213	11,3
Brøndbyvester, rent vand	600	5,2	180	10,8
Regnemark, rent vand	600	5,2	139	7,3
Søndersø, råvand	600	5,2	140	7,6
Dalum, råvand	600	5,2	126	8,8
Dalum, rent vand	600	5,2	126	8,0
Lindved, råvand	270	11,5	122	4,5

Anlægget er opbygget med PLC og styrepanel samt fjernoverførsel af måledata til bærbar PC, hvorfra overvågningen kan følges. Anlægget kører fuldautomatisk. Anlægget er desuden bestykket med et vandpanel med overvågning af turbiditet og pH samt konduktivitet, temperatur og ilt efter pelletreaktoren og efter filteret, hvor iltningen finder sted vha. en beluftningsring over sandet (Tabel 2). Analyseresultater for indløbsvandet til pelletreaktoren målt uafhængigt af in-situ målinger undervejs i forsøgene er angivet som reference (Tabel 2).

**Tabel 2** Generelt fysisk/kemisk driftsdata for vandet efter pelletreaktoren og filteret målt in-situ på pilotanlægget på de fire vandværker. IM = Ikke målt.

Vandtype	pH			Ilt (mg/L)			Ledningsevne (mS/m)			Turbiditet (FTU)		
	Før*	Efter reaktor	Efter filter	Før*	Efter reaktor	Efter filter	Før*	Efter reaktor	Efter filter	Før*	Efter reaktor	Efter filter
Brøndbyvester råvand	7,1	9,1	7,6	0,6	0,3	9,5	105,5	121,5	128,2	IM	3,7	0,2
Brøndbyvester rent vand	7,3	9,0	7,9	10,6	9,4	10,1	106,2	116,3	122,5	0,2	4,4	0,1
Regnemark rent vand	7,3	9,2	7,7	9,4	8,0	11,3	77,3	86,9	97,3	0,1	1,9	0,1
Søndersø råvand	7,1	8,9	7,84	0,6	0,4	7,5	82,5	69,1	69,5	2,1	3,0	0,1
Dalum råvand	7,3	8,9	7,9	1,3	0,3	8,0	83,0	67,7	71,1	3,5	2,1	0,1
Dalum rent vand	7,5	9,0	8,0	9,0	9,1	10,8	82,7	64,4	69,2	0,1	2,3	0,1
Lindved råvand	IM	9,1	8,2	IM	3,2	9,2	IM	60,7	68,0	IM	3,6	0,1

\* Analyseresultater for vandet "før" pelletreaktoren er målt af analyselaboratorier særskilt fra in-situ målingerne.

Erfaringer med anlæg og drift er yderligere beskrevet i kapitel 5, Teknisk erfaringsopsamling.



### 3. Forsøg og forsøgsperiode

Pelletreaktoren blev undersøgt på fire forskellige vandværker med hvert sit underliggende fokus for behandlingen. Udover at undersøge effektiviteten af blødgøringen på vandets indhold af calcium, samt vandets bestanddele af makroioner og metaller, giver Tabel 3 en oversigt over forsøg og delforsøg, tidsperioden for forsøgene og i hvilke appendiks, de enkelte forsøg er dokumenteret:

**Tabel 3** Oversigt over forsøg og delforsøg, samt tidsperiode for forsøget.

Vandværk	Forsøg og delforsøg	Tidsperiode	Appendiks
Brøndbyvester	Fjernelse af calcium og metaller	26.02.14 – 08.05.14	1
	Fjernelse af nikkel		
Søndersø	Fjernelse af calcium og metaller	14.11.14 – 11.12.14	2
	Pellet produktion		
Dalum	Fjernelse af calcium og metaller	16.03.15 – 15.06.15	3
	Fjernelse af BAM*	11.05.15 – 12.05.15	-
	Afrensning af kalk	01.06.15 – 03.06.15	4
	Alternative behandlingsmetoder	28.04.15 – 23.06.15	5
Lindved	Fjernelse af calcium og metaller	15.07.15 – 15.08.15	6
	Fjernelse af fluorid		
	Hygiejnisk barriere	17.08.16 – 19.08.16	7
	Fjernelse af arsen	06.08.16	8
	Overfladers afvisning af kalk	03.08.16 – 28.08.16	9

\*Resultatet af forsøg med fjernelse af BAM er skrevet direkte ind i denne rapport og indgår derfor ikke som appendiks.

På Brøndbyvester vandværk tilføres også rent vand fra Værket ved Regnemark. Vand fra Brøndbyvester vandværk blandes med vand fra Værket ved Regnemark før det sendes til forbrugerne. Der er derfor udtaget vandprøver fra Værket ved Regnemark, hvis resultater indgår i resultatafsnittet.

# 4. Materialer og metode

## 4.1 Vandprøver

For at undersøge blødgøringens effekt på calcium, udvalgte makroioner og metaller blev der udtaget vandprøver på samtlige vandværker involveret i projektet over en længere prøveperiode. Vandprøver blev udtaget af HOFOR og VCS og analyseret af DTU Miljø. På Brøndbyvester vandværk og Værket ved Søndersø blev vandprøverne også analyseret af HOFOR. Eurofins og Agrolab blev benyttet af henholdsvis HOFOR og VCS til at udtage og analysere vandprøver for enkelte parametre. Resultatet af disse analyser er afleveret for følgende parametre: Calcium, magnesium og hårdhed. For de resterende parametre er analyseresultater fra DTU Miljø benyttet. I appendiks 1 og 2 for Brøndbyvester vandværk og Værket ved Søndersø er resultater fra HOFOR afleveret og sammenholdt med resultater fra DTU Miljø.

Analyseresultater er generelt angivet som et gennemsnit af flere prøver og hvis koncentrationen var under detektionsværdien, indgik denne i beregning af gennemsnittet.

Vandprøver blev udtaget tre steder:

- Før pelletreaktoren
- Efter pelletreaktoren
- Efter sandfilteret

Alle vandprøver blev analyseret for 19-20 udvalgte grundstoffer.

Metaller såsom jern, mangan, natrium, kalium, calcium og magnesium blev målt ved ICP-OES (Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy). Derudover forekommer en række spormetaller i meget lave koncentrationer, hvorfor de blev analyseret ved ICP-MS (Induktiv Coupled Plasma – Mass Spectroscopy).

## 4.2 Pelletprøver

Pellets udtaget fra pelletreaktoren blev undersøgt for sammensætning af de aflejrede makroioner og spormetaller, samt for sammensætningens udvikling over tid. Dette blev undersøgt, for at vurdere om pellets kan bruges som jordforbedringsmiddel i landbruget.

Pellets blev totaloplukket iht. US EPA 3051A (syre- og mikrobølge-oplukning) og analyseret med ICP-MS og ICP-OES for 19-20 udvalgte grundstoffer. Ved oplukningsmetoden opløses hele pellets og sandkornet ligger tilbage. Ved afvejning af pellets (mg/kg) er sandkornet medregnet.

Pelletsaflejringen ved forskellige dybder i pelletreaktoren blev undersøgt ved hjælp af Scanning Elektron Mikroskopi (SEM). Pellets blev derfor udtaget 1m, 3m, 4m og 5m under pelletstanden og fra 5,7m, 10 cm over bunden af pelletreaktoren. De udtagne pellets blev indlejret i en resin, slebet og poleret for at opnå fuldt tværsnit.

## 4.3 Yderligere forsøg

Ud over at undersøge de generelle forhold for blødgøringsprocessens indvirkning på metaller i vandet og pellets, blev der udført nogle supplerende forsøg for at undersøge henholdsvis:

- Afrensning af kalk i pelletreaktoren
- Alternative behandlingsmetoder

- Blødgøringsprocessen som hygiejnisk barriere
- Fjernelse af arsen under blødgøring
- Overfladers afvisning af kalk

Metoden til de enkelte delforsøg er beskrevet i de vedhæftede appendiks 4-5 og 7-9.

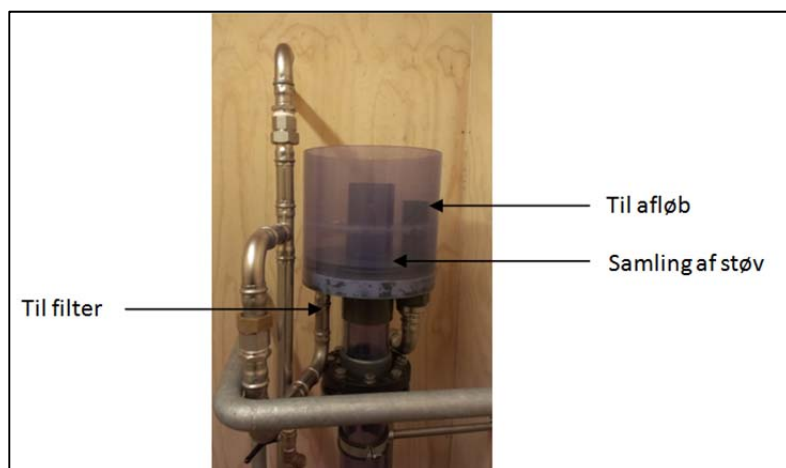
# 5. Teknisk erfaringsopsamling

## 5.1 Dosering af sand

I demonstrationsforsøgene blev der brugt sand med middeldkornstørrelse på ca. 0,3 mm: Dansand 29 (0,18-0,50 mm), Dansand 33 (0,18-0,71 mm) og sand fra Weber "Ovntørret kvartssand 0,3-0,6 mm" hos VCS. Sandets kornstørrelse påvirker overfladearealet tilgængeligt til udfældning af kalk og vandflow igennem pelletreaktoren, da flowet kan være højere med tungere sandkorn.

Før sandet kan anvendes i processen skal det skylles for at fjerne det fine støv, der ellers kan ende med at blokere sandfilteret. Det anbefales at skylle sandet med et flow på ca. 750-850 l/t, et lidt højere flow end ved normal drift. Der skylles til vandet i udløbet af pelletreaktoren er partikelfrit. Afhængigt af mængden af støv i sandet, kan skylleprocessen tage fra tre til 24 timer.

Det anbefales derfor at vælge en sandtype med så lille en sandfraktion under 0,25 mm som muligt. Når sand skylles, skal udløb til filteret lukkes, så vandet løber direkte til afløb og støv samler sig i kanten, øverst i pelletreaktoren (Figur 2). Støvet kan efterfølgende støvsuges ud af pelletreaktoren, inden pelletreaktoren sættes i drift.



**Figur 2** Toppen af pellet pelletreaktoren

Med et vandflow på 600 l/t og en fjernelse af ca. 13 °dH, vil det tage ca. 10 dage før pellets i pelletreaktoren når en størrelse på ca. 1-1,5 mm, hvor det anbefales, at de tappes fra pelletreaktoren (van Dijk, 2007) (Figur 3). Pellets kan tappes fra bunden af pelletreaktoren, mens den er i drift. Det er vigtigt at overvåge pellet-størrelsen omhyggeligt, da for store pellets kan føre til kollaps af pelletreaktoren. Der skal også tappes pellets for at holde pellethøjden i pelletreaktoren under 6 m. Med et vandflow på 600 l/t og en fjernelse af ca. 13 °dH produceres ca. 3 kg (2 l) pellets pr. dag og pellethøjden stiger ca. 25 cm per dag.

Hvis de fjernede pellets er ca. 1 mm i diameter, med en kornstørrelse på 0,3-0,5 mm, udgør sand 3-5 % af pellets i volumen. Derfor skal der tilsættes nyt sand, svarende til 3-5 % af det tappede volumen pellets, dvs. ca. 40 ml per dag. For at kunne tilsætte sand i pelletreaktoren, skal indløbsflowet reduceres til 400 l/t og sandet tilsættes fra toppen af pelletreaktoren.

For at reducere skylletiden af sandet anbefales det, at si eller vaske sandet før tilsætning.



**Figur 3** Rent sand fra d. 16. marts fra Dalumværket og pellets fra pelletreaktoren som de gradvist bliver større og større og til sidst tappes efter at have nået en størrelse på 1-1,5 mm.

Ved planlægning af pellettapning og sandtilsætning tilstræbes en balance mellem tidsforbrug og optimal og stabil suspendering af pellets, da tapning og tilsætning håndteres manuelt i pilotanlægget. Det anbefales at undgå ændringer i pellethøjden i pelletreaktoren på mere end 1,5-2 m ved pellettapning, da store ændringer kan føre til midlertidig ubalance i blødgøringsprocessen. Da sandtilsætning er det mest tidskrævende ved processen på grund af skylning, anbefales det, at der kun tilsættes sand for hver tredje pellettapning.

## 5.2 Opstart af pilotanlæg

Efter skylning af sand kan pelletreaktoren tages i brug. Det er vigtigt at starte dosering af NaOH langsomt ved at øge doseringen henover en time, indtil det ønskede niveau er nået. I VCS faldt pH-niveauet over et døgn's tid efter tilsætning af sand og det var derfor nødvendigt herefter at øge doseringen manuelt. Fjernelse af kalk fra vandet vil kunne måles umiddelbart, dog med de ca. 5 minutters forsinkelse, som det tager vandet at stige op gennem pelletreaktoren.

## 5.3 Transport og opsætning af pilotanlæg

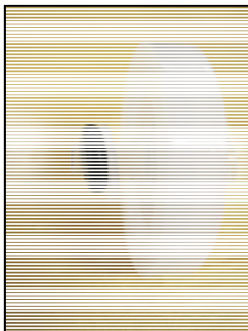
Før transport af anlægget skal de tre containere gøres klar til adskillelse: Toppen af filteret skal afmonteres, pelletreaktoren skal adskilles og trapperne i anlægget skal fjernes. De tre containere kan flyttes med en kran og transporteres på en lastbil. Det tager et par timer at afmontere anlægget og igen et par timer at samle anlægget. Transport af pilotanlægget kostede ca. 8.000 kr. og 15.000 kr. for transport på henholdsvis 20 km og 160 km.

Pilotanlægget skal tilsluttes råvand, afløb og el, hvilket tager ca. 1-2 dage. Der skal også regnes med en dag til opstart af anlægget med påfyldning af filteret, pelletreaktoren og NaOH-beholderen.

## 5.4 Sikkerhed

NaOH er meget korrosivt og man skal være varsom ved opfyldning af NaOH beholderen. Da produktet er ætsende, skal der anvendes beskyttelseshandsker og –briller samt særligt arbejdstøj. Der er øjenbruser inde i pilotanlægget, og der skal også være en hane med vand til skylning, sikkerhedsdatablad og arbejdspladsbrugsanvisning (APB). Der skal bruges en PE slange (suge-/trykslange PE  $\varnothing$ 4x6mm 10 bar) til NaOH-tilsætning fra NaOH-beholder til reaktor. NaOH-beholder og -dunk skal opbevares på en spildbakke.

Der er en CO<sub>2</sub>-alarm inde i pilotanlægget. Filter til alarmgasmåler (Figur 4) skal skiftes med jævne mellemrum, ca. hver 4. uge, for at undgå at det stopper til og alarmen går. Der er i øvrigt nødudgang fra den øverste container, hvor der ligger en rebstige til at klatre ned ad.



**Figur 4** Filter til gasmåler

## **5.5 Andet**

I pelletreaktoren tilføres NaOH gennem en opskåret silikoneslange. Denne løsning blev valgt på basis af erfaringer fra Holland, hvor den primære udfordring ved drift af pelletreaktoren er doseringsmåden for NaOH. Der, hvor basen strømmer ud, udfældes kalk, hvorefter doseringsudstyret med jævne mellemrum skal tages op for at renses. Dette er ikke muligt, eller meget besværligt i pilotanlægget, hvorfor der blev anvendt en opskåret elastisk slange, hvor kalkudfældninger af sig selv frigøres uden at tilstoppe slangen. Udstrømning fra slangen har i forsøgsperioderne fungeret upåklageligt. Med den nuværende opsætning er det dog ikke muligt at teste udstrømning af NaOH, hvilket er en af de afgørende parametre for optimering af processen.

Der skal være tilstrækkeligt tryk på råvand til pumpen (0,2-0,3 bar) og fra pumpen ind i pelletreaktoren (1-2 bar) til at kunne løfte pellets. Da der ikke er nogen reduceringsventil på pilotanlægget, var det ved behandling af færdigbehandlet drikkevand nødvendigt at installere en mellembeholder for at drosle indgangstrykket fra 5,5 bar til 0,2-0,3 bar.

Flow fra vand- og luftskyllepumper skal reguleres for hvert nyt filter ved at lave en skylletest.

Det er vigtigt at rense pelletreaktoren med fortyndet saltsyre eller citronsyre (jf. appendiks 4) efter den har været i brug i nogle uger, da kalk og pellets sætter sig på kanten og i bunden af pelletreaktoren.

# 6. Blødgøring af vand

I Danmark måles vandets hårdhed i tyske hårdhedsgrader (°dH) og angives ved summen af koncentrationerne af calcium- og magnesiumioner,  $\text{Ca}^{2+}$  og  $\text{Mg}^{2+}$  i mol/L.

1 °dH svarer til at vandet indeholder 10 mg CaO pr L:

$$1^\circ\text{dH} = [\text{CaO}] = \frac{0,010 \text{ g/l}}{56,08 \text{ g/mol}} = 1,78 \cdot 10^{-4} \text{ M} \Leftrightarrow 1^\circ\text{dH} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] = 1,78 \cdot 10^{-4} \text{ M} \Leftrightarrow \frac{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}{1,78 \cdot 10^{-4} \text{ M}}$$

Vandets hårdhed varierer meget i Danmark, men fælles for de fire vandværker der indgår i projektet er, at vandet klassificeres som hårdt og særdeles hårdt (Tabel 4).

Blødgøring ved brug af pelletreaktoren på Brøndbyvester vandværk resulterede i blødgjort vand af klassen middelhårdt, og af klassen blødt vand for Værket ved Søndersø, Dalumværket og Lindvedværket (Tabel 4). Det ses yderligere, at blødgøringen reducerede den totale hårdhed med mellem 61 og 71 % (Tabel 4).

Blødgøring af rent vand er generelt mere effektivt end blødgøring af råvand. Med den samme mængde natronlud reduceres hårdheden af 'Dalumværket, rent vand' mere end 'Dalumværket, råvand' (Tabel 4). Hverken calcium, magnesium eller hårdhed blev målt af Eurofins (akkrediteret laboratorie) på Brøndbyvester vandværk ved behandling af det færdigbehandlede drikkevand, men resultater fra DTU Miljø og HOFOR viste ligeledes, at blødgøring af rent vand er mere effektivt end blødgøring af råvand. Det er også forventet, da der er en lavere koncentration af  $\text{CO}_2$  i rent vand (fjernet ved iltning), der ellers ville reagere med NaOH.

**Tabel 4** Vandets hårdhed på fire vandværker før og efter blødgøring ved brug af pelletreaktor. Blødgøring er undersøgt på både råvand og færdigbehandlet vand af autoriseret og akkrediteret laboratorie.

	Hårdhed				
	Før (°dH)	Klassificering*	Efter (°dH)	Klassificering*	Reduktion (%)
Brøndbyvester, råvand**	31,0	Særdeles hårdt	9,5	Middelhårdt	70
Regnemark, rent vand**	21,0	Hårdt	8,2	Middelhårdt	61
Søndersø, råvand**	21,0	Hårdt	7,0	Blødt	67
Dalum, råvand***	19,5	Hårdt	6,2	Blødt	68
Dalum, rent vand***	19,4	Hårdt	5,6	Blødt	71
Lindved, råvand***	17,2	Hårdt	5,7	Blødt	67

\* GEUS Hårdhedskortet (GEUS, 2015)

\*\* Målt af Eurofins, én gang (DS/ISO 17294-2)

\*\*\* Beregnet som gennemsnit af Agrolabs fire målinger af calcium og magnesium (DS/ISO 17294-2)

Både calcium og magnesium er essentielle mineraler for menneskers helbred og næsten 80 % indtages via fødevarer (herunder vand) (WHO, 2011a). Noget tyder på, at magnesiummangel medfører flere hjertekar-relaterede sygdomme og type 2 diabetes, mens lavt indtag af calcium bl.a. kan medføre osteoporose, endetarms- og tyktarmskræft, samt flere cariestilfælde (WHO, 2011a).

Blødgøring af vand ved brug af pelletreaktor og tilførsel af natronlud havde en direkte indvirkning på koncentrationen af calcium i vand ved udfældning af  $\text{CaCO}_3$ . Calcium i vandet reduceredes med mellem 78 og 85 % for de fire vandværker, og endte på en koncentration mellem 16,8 til 27,0 mg/L (Tabel 5).

For de fire vandværker var der ved blødgøring af både råvand og færdigbehandlet drikkevand en reduktion af magnesium fra ingen til 9 %. Dette er en ganske lille reduktion og vil givetvis ikke udgøre en stor forskel i det daglige indtag af magnesium.

Det var primært reduktionen af calcium, der medvirkede til blødgøringen af vandet (Tabel 5).

Det skal bemærkes, at det vand, der kommer ud af pelletreaktoren, ikke er færdigbehandlet, og opblandes efterfølgende med ikke-blødgjort vand, så koncentrationen af calcium og magnesium er højere end angivet i Tabel 4 og 5, når det når forbrugeren.

**Tabel 5** Reduktion af  $\text{Ca}^{2+}$  og  $\text{Mg}^{2+}$  i vandet efter blødgøring af råvand og færdigbehandlet vand fra fire vandværker.

	Ca			Mg		
	Før (mg/L)	Efter (mg/L)	Reduktion (%)	Før (mg/L)	Efter (mg/L)	Reduktion (%)
Brøndbyvester, råvand	180,0	27,0	85	27,0	25,0	7
Regnemark, rent vand	110,0	24,0	78	23,0	21,0	9
Søndersø, råvand	110,0	22,0	80	14,0	14,0	0
Dalum, råvand	117,3	23,4	80	13,6	12,8	6
Dalum, rent vand	116,3	18,8	84	13,7	12,8	6
Lindved, råvand	98,7	16,8	83	14,7	14,5	2



# 7. Fjernelse af makroioner, spormetaller og BAM

Adskillige makroioner og metaller ønskes ikke fjernet i blødgøringsprocessen, da de kan have positiv indvirkning på sundheden eller den efterfølgende vandbehandling. Tungmetaller er derimod uønskede i drikkevand, og det er derfor fordelagtigt, at de fjernes i blødgøringsprocessen.

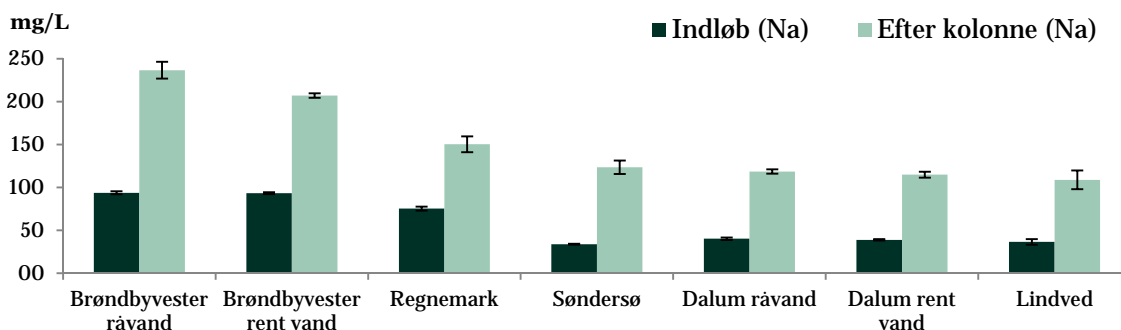
For alle vandværker var indholdet af samtlige analyserede metaller stabile i ind- og udløbet fra pelletreaktoren og sandfilteret efter ganske få dage efter igangsættelse af blødgøringsprocessen, og der var generelt ikke nogen forskel på koncentrationen i udløbet fra pelletreaktoren og udløbet fra sandfilteret.

## 7.1 Makroioner (Na, Fe, Mn, P, K)

Natrium (Na), jern (Fe), mangan (Mn), fosfor (P) og kalium (K) er makroioner, der naturligt forekommer i det danske grundvand og derfor kan påvirkes af blødgøringsprocessen.

Som følge af dosering af natronlud til pelletreaktoren steg natriumkoncentrationen betragteligt i pelletreaktoren for samtlige vandværker (Figur 5). Koncentrationen af natrium steg med mellem 99 til 266 % ved dosering af natronlud.

Koncentrationen er angivet som et gennemsnit for koncentrationen af de vandprøver, der blev udtaget over varierende tidsperioder for de enkelte vandværker, med tre til 18 vandprøver pr. vandværk.



**Figur 5** Gennemsnit af natriumkoncentrationer ( $3 < N < 18$ ) i indløb og udløb fra pelletreaktoren på fire forskellige vandværker ved råvand og færdigbehandlet vand.

Natriumkoncentrationen målt i udløbet fra pelletreaktoren opsat på Brøndbyvester vandværk, overskred drikkevandsbekendtgørelsens kvalitetskrav på 175 mg/L både ved behandling af råvand og færdigbehandlet drikkevand (Figur 5). Vandet på Brøndbyvester vandværk var særdeles hårdt (Tabel 4), og der blev derfor tilsat relativt meget natronlud ved behandling af vandet (Figur 5).

Natrium kan ikke lugtes i vand, men ved koncentrationer over 200 mg/L kan det smages. WHO har ikke fastsat nogen sundhedsmæssig guideline for natrium i drikkevand, da vandets bidrag udgør en lille del af det samlede daglige indtag (WHO, 2011b) og ikke anses for skadeligt ved normalt indtag via fødevarer. Et øget indtag af natrium kan dog være problematisk for folk med forhøjet blodtryk, hjertesygdomme eller nyreproblemer (Naturstyrelsen, 2011).

Indløbskoncentrationer af jern og mangan varierede meget på de fire undersøgte vandværker. De to vandværker i hovedstadsområdet, Brøndbyvester vandværk og Værket ved Sønder sø havde en indløbskoncentration af jern på henholdsvis 1,2 mg/L og 2,7 mg/L. Vand fra Værket ved Regnemærk,

Lindvedværket og Dalumværket, derimod havde indløbskoncentrationer af jern på 0,002 til 0,563 mg/L. Mangankoncentrationen i indløbsvandet var størst på vandværkerne placeret på Fyn (Tabel 6).

Ved oxidation af  $\text{Fe}^{2+}$  til  $\text{Fe}^{3+}$ , udfælder okker. Denne proces finder delvist sted i sandfilteret, og medvirker til udfældning af en række tungmetaller som fx bly, cadmium, krom, arsen og selen. For at sikre udfældning af tungmetaller er det derfor vigtigt, at de enten udfælder på pellets undervejs i blødgøringen, eller at der er nok opløst jern tilbage efter blødgøring til at tilbageholde tungmetaller i sandfilteret. Mangan udfældes ved iltning og filtrering ligesom jern (Winther et al., 2010).

**Tabel 6** Gennemsnitlige indløbs- og udløbskoncentrationer af jern og mangan fra pelletreaktoren på de fire respektive vandværker, Brøndbyvester vandværk, Værket ved Regnemark, Værket ved Søndersø, Dalumværket og Lindvedværket. Derudover er reduktionen af jern og mangan angivet for hvert enkelt vandværk. Gennemsnittet er baseret på fjernelsen mellem parvise vandprøver, beregnet ud fra 3-18 vandprøver.

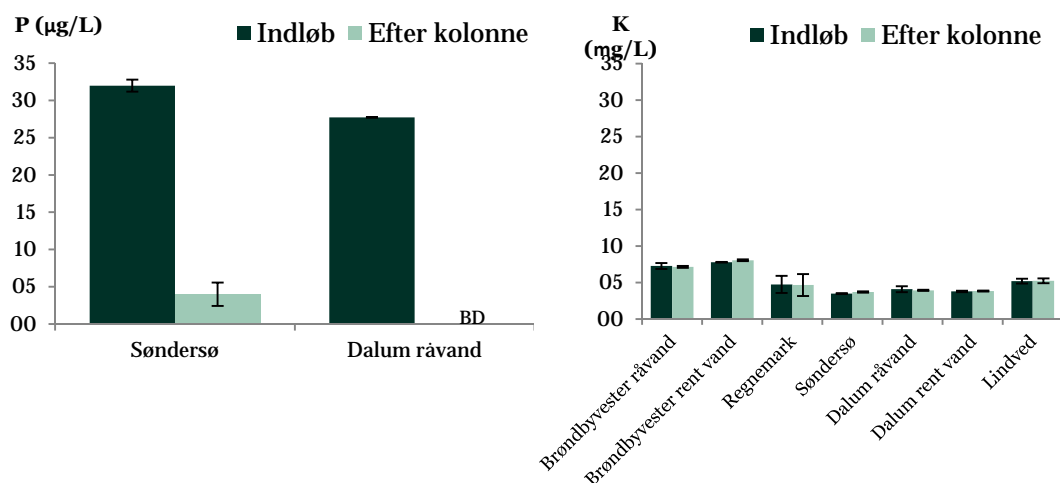
	Fe			Mn		
	Indløb ( $\mu\text{g/L}$ )	Efter reaktor ( $\mu\text{g/L}$ )	Reduktion (%)	Indløb ( $\mu\text{g/L}$ )	Efter reaktor ( $\mu\text{g/L}$ )	Reduktion (%)
Brøndbyvester, råvand	1195,1	93,6	94	28,2	1,0	96
Brøndbyvester, rent vand	3,0	3,6	-17	2,3	< MDL	93
Regnemark, rent vand	2,0	2,0	5	0,2	0,2	-60
Søndersø	2717,8	256,9	91	70,7	2,2	97
Dalum, råvand	563,4	95,0	77	245,6	5,2	98
Dalum, rent vand	13,4	16,5	-36	0,5	0,8	-99
Lindved	6,6	42,2	-610	140,3	6,3	95

Generelt reduceredes mangankoncentrationen i højere grad ved blødgøring end jern (Tabel 6). Det var kun jernindholdet på Værket ved Søndersø, der efter pelletreaktoren stadig overskred kvalitetskravet på 100 ( $\mu\text{g/L}$ ), men blev efter sandfilteret reduceret til 16  $\mu\text{g/L}$ . Ved blødgøring af færdigbehandlet drikkevand var koncentrationerne af jern og mangan så lave, at der ikke blev målt nogen reduktion gennem pelletreaktoren og resultaterne var generelt behæftede med usikkerhed. På Lindvedværket blev der etableret en 1 m<sup>3</sup> åben beholder på råvandstilgangen, for at muliggøre forsøget med "Blødgøring som hygiejnisk barriere" (afsnit 10). Opsætningen forårsagede, at vandet til pelletreaktoren blev delvist iltet og at okker aflejredes i rør og reaktor. De højere koncentrationer af jern i udløbsvandet kan derfor være målinger af løsrevet okker (Tabel 6).

Resultatet viser, at traditionel behandling af drikkevand ved beluftning efterfulgt af filtrering i biologiske sandfiltre, givetvis vil påvirkes af en forudgående blødgøring. Dette skyldes, at jern- og manganindholdet i vandet reduceres betragteligt ved blødgøring, og ved traditionel behandling bidrager processerne hvormed jern og mangan reduceres til samtidig udfældning af tungmetaller.

Fosfor blev kun detekteret i indløbsvandet på Værket ved Søndersø og Dalumværket (Figur 6). På Værket ved Søndersø reduceredes fosforkoncentrationen i udløbsvandet med 87 % og endte med en koncentration på 4  $\mu\text{g/L}$ . På Dalumværket var koncentrationen af fosfor i udløbsvandet under detektionsgrænsen.

Kalium var upåvirket af blødgøringen (Figur 6).

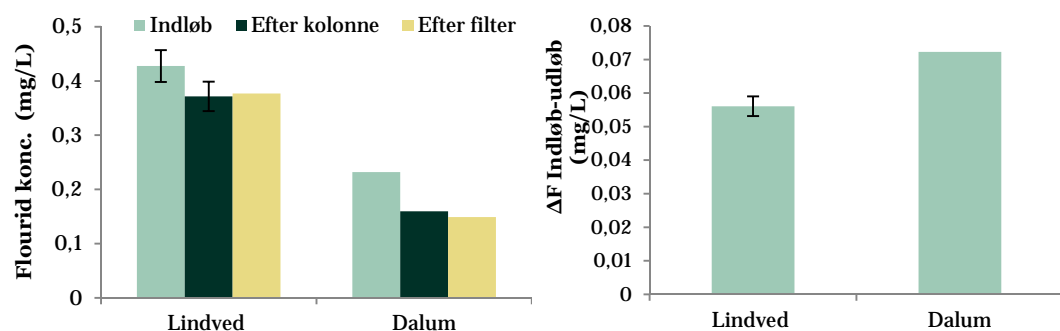


**Figur 6** Venstre: Gennemsnit af fosforkoncentrationer ( $3 < N < 18$ ) i indløb og udløb fra pelletreaktoren på Værket ved Søndersø og Dalumværket ved råvandsbehandling. Højre: Gennemsnit af kaliumkoncentrationer ( $3 < N < 18$ ) i indløb og udløb fra pelletreaktoren på Brøndbyvester vandværk-råvand, Brøndbyvester vandværk-rent vand, Værket ved Regnemark, Værket ved Søndersø, Dalumværket-råvand, Dalumværket-rent vand og Lindvedværket. BD = below detection

## 7.2 Fluorid

Grænseværdien for fluorid i drikkevand er 1,5 mg/L (Miljøministeriet, 2014). Råvandets indhold af fluorid på Lindvedværket var i gennemsnit 0,43 mg/L, og der var derfor ingen overskridelse af grænseværdien. Det er imidlertid ikke ønskeligt at fjerne fluorid fra vandet, da fluorid beskytter mod huller i tænderne (Lennon et al., 2004).

Blødgøringens effekt på koncentrationen af fluorid blev undersøgt på Lindvedværket og sammenlignet med resultatet fra en enkelt prøvetagning af ind- og udløbsvandet fra pelletreaktoren opsat på Dalumværket. Generelt reducerede blødgøringsprocessen indholdet af fluorid i vandet. På Lindved reduceredes koncentrationen fra indløb til udløb med 13 % (gns.), hvorimod det reduceredes med 31 % på Dalumværket (Figur 7). Der blev fjernet nogenlunde lige meget fluorid på Lindvedværket og Dalumværket (0,056-0,072 mg/L), selv om indløbskoncentrationen var forskellig indløbskoncentrationen var forskellig (Figur 7).

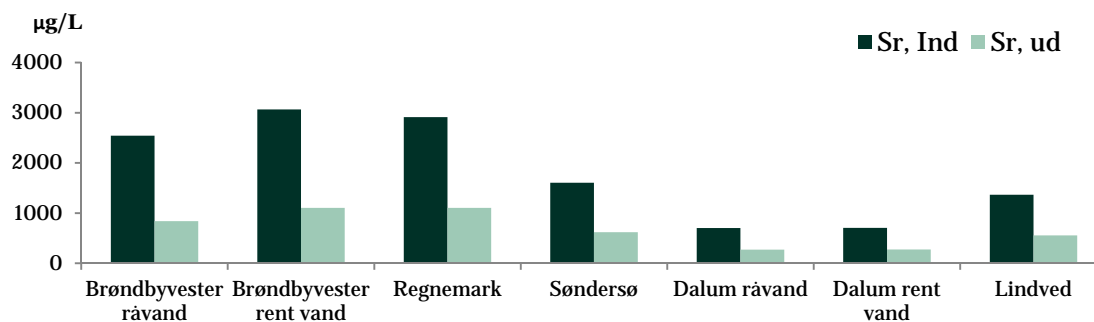


**Figur 7** Venstre: Fluoridkoncentrationer i indløb, efter pelletreaktoren og efter filter på Lindvedværket ( $N=3$ ) og Dalumværket ( $N=1$ ). Højre: Reduktion af fluoridkoncentrationen mellem indløb og udløb fra kolumnen på henholdsvis Lindvedværket og Dalumværket.

## 7.3 Spormetaller (Li, Al, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Sn, Tl, Pb)

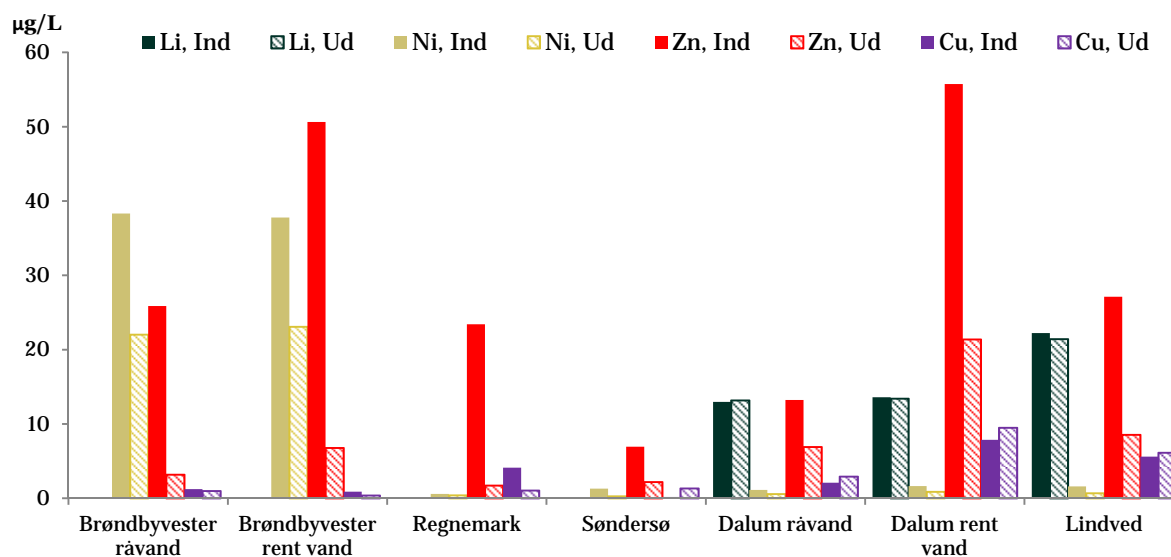
Spormetaller er karakteriseret ved deres lave koncentration ( $\mu\text{g/L}$ ). Nogle spormetaller, som fx kobolt (Co), kobber (Cu), strontium (Sr) og zink (Zn), er i små mængder essentielle for levende organismer, mens de i høje koncentrationer bliver skadelige. Andre spormetaller såsom bly (Pb) og cadmium (Cd) har ingen umiddelbar gavnlig virkning på levende organismer, og ophobning af dem i kroppen kan forårsage alvorlige sygdomme.

Koncentrationen af spormetallerne i indløbsvandet til pelletreaktoren varierede mellem de syv vandtyper. Derudover var koncentrationerne for adskillige af de undersøgte metaller så lave, at der var betydelig usikkerhed på resultaterne. Strontium var det spormetal, der blev målt i vandet i højeste koncentrationer (Figur 8). Reduktion af strontium (60-67 %) i pelletreaktoren var meget ensartet på tværs af de fire vandværker og ved behandling af råvand såvel som af færdigbehandlet drikkevand, uafhængig af indløbskoncentrationen.



**Figur 8** Gennemsnit af strontiumkoncentrationer ( $3 < N < 18$ ) i indløb og udløb fra pelletreaktor på fire forskellige vandværker ved behandling af både råvand og færdigbehandlet drikkevand.

Nikkel, zink og kobber blev ligeledes påvist i indløbsvandet på samtlige vandværker, men i betragteligt lavere koncentrationer end strontium. Indeholdet af lithium blev kun undersøgt i vandet fra de fynske vandværker (Figur 9).



**Figur 9** Gennemsnit af lithium-, nikkel-, zink- og kobberkoncentrationer ( $3 < N < 18$ ) i indløb og udløb fra pelletreaktoren på fire forskellige vandværker ved behandling af både råvand og færdigbehandlet drikkevand.

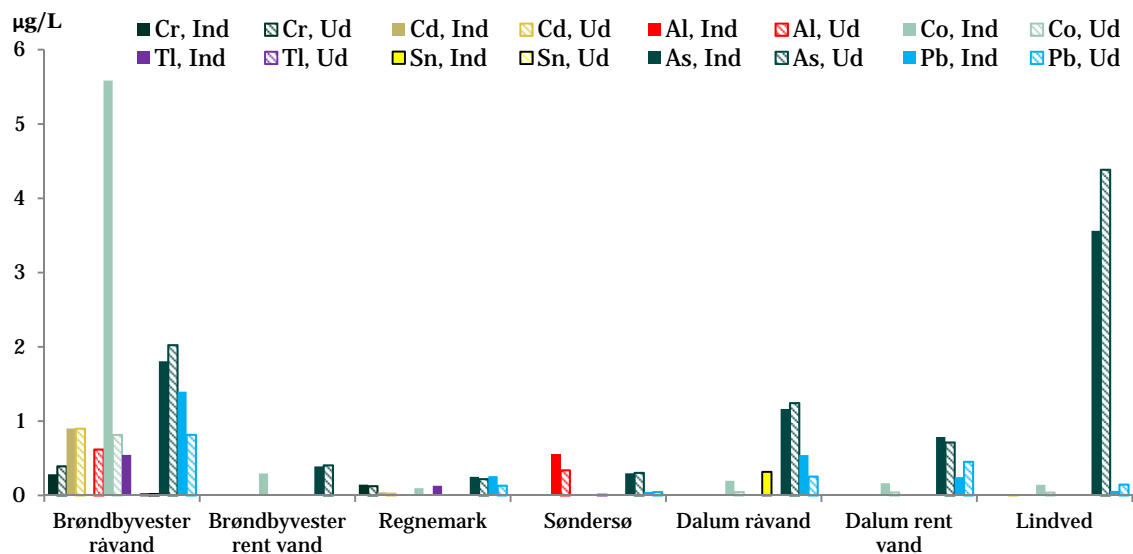
Det naturlige indhold af lithium i drikkevand anses for at have en positiv indvirkning på det mentale helbred, og lithiums virkning som antidepressivt middel er bredt anerkendt inden for psykiatrien. Lithium har derudover forebyggende egenskaber mod selvmord (Kapusta et al., 2011). Selv om effekten af terapeutiske doser af lithium er veletableret, er de helbredsmæssige virkninger af naturlig lithiumindtagelse via drikkevand stadig ukendte (Kapusta et al., 2011). På baggrund af forsøgene, har blødgøring ikke nogen effekt på koncentrationen af lithium i vandet.

Nikkelkoncentrationen i udløbsvandet lå betragteligt under vandkvalitetskravene på 20 µg/L for alle vandværker bortset fra Brøndbyvester vandværk, som overskred kvalitetskravet i både indløbs- og udløbsvandet fra pelletreaktoren og sandfilteret. Nikkel reduceredes i gennemsnit med 41 %. Der var

ingen overskridelser af kvalitetskravene for zink i hverken indløbs- eller udløbsvandet for de fire vandværker, og zink-koncentrationen reduceredes i gennemsnit med 72 % og den procentuelle reduktion var ligesom for nikkel stabil, uafhængig af indløbskoncentrationen.

Kobber er et af flere mikro-næringsstoffer, som er essentielle for mikroorganismer. Den biologiske fjernelse af fx ammonium i sandfiltre i drikkevandsbehandlingen kunne derfor blive påvirket, hvis blødgøringsprocessen fjerner kobber fra indløbsvandet til sandfilteret (Wagner et al., submitted). Tilsyneladende steg koncentrationen af kobber ved behandlingen af fire af syv vandtyper, men dette skyldes formodentligt måleusikkerhed, da koncentrationerne var meget lave. Det kan dog ikke afvises, at der findes kobberholdige materialer som fx messingfittings i anlægget, som lækkede kobber ud i vandet.

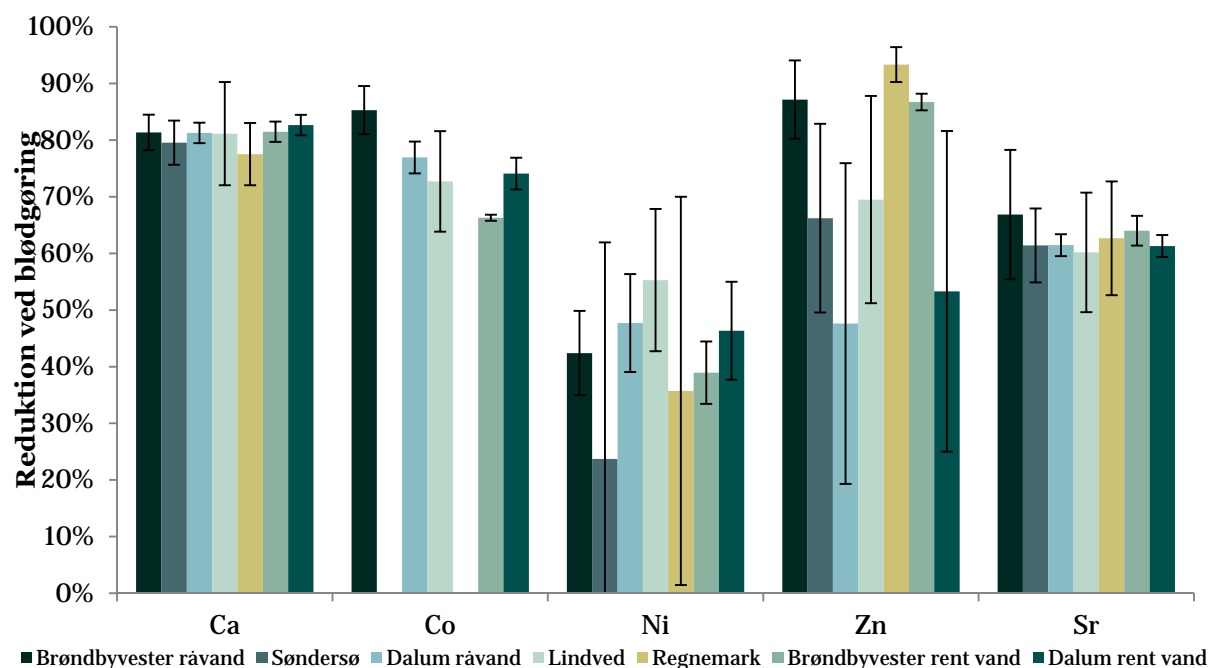
Af de spormetaller med laveste indløbskoncentrationer (krom, cadmium, aluminium, kobolt, thallium, tin, arsen og bly), blev kun arsen påvist i indløbsvandet ved samtlige vandværker (Figur 10).



**Figur 10** Gennemsnit af krom-, cadmium-, aluminium-, kobolt-, thallium-, tin-, arsen- og blykoncentrationer ( $3 < N < 18$ ) i indløb og udløb fra pelletreaktoren på fire forskellige vandværker ved behandling af både råvand og færdigbehandlet drikkevand.

Bortset fra kobolt, som generelt reduceredes med 75 %, er der med de meget lave koncentrationer generelt ingen entydig sammenhæng mellem blødgøring og fjernelse af spormetaller. Kobolt i indløbsvandet til pelletreaktoren på Brøndbyvester vandværk ved behandling af råvand overskred som den eneste af spormetallerne fra Figur 10 kvalitetskravet ( $5 \mu\text{g/L}$  for kobolt), men ved udløb fra pelletreaktoren var koncentration reduceret til langt under kvalitetskravet.

Koncentrationen af nikkel efter blødgøring af færdigbehandlet drikkevand på både Brøndbyvester vandværk og Dalumværket blev reduceret i samme størrelsesorden som ved blødgøring af råvand, selv om koncentrationen af jern og mangan var meget forskellig for de to vandtyper. Nikkelaflejring på pellets var derfor umiddelbart uafhængig af, om vandet var reduceret eller iltet, hvilket tilsvarende gjorde sig gældende for kobolt, zink og strontium (Figur 11).



**Figur 11** Den gennemsnitlige reduktion af calcium, kobolt, nikkel, zink og strontium i indløb og udløb fra pelletreaktoren på Brøndbyvester vandværk-råvand, Brøndbyvester vandværk-rent vand, Værket ved Regnemark, Værket ved Sønderød, Dalumværket-råvand, Dalumværket-rent vand og Lindvedværket. Kobolt måles ikke i indløbsvandet på Værket ved Sønderød og Værket ved Regnemark.

#### 7.4 Arsen

Arsen fjernelse blev undersøgt specifikt ved drift af pelletreaktoren på Lindvedværket. I forsøgsperioden blev der udtaget en enkelt vandprøve fra ind- og udløbet til pelletreaktoren med henblik på at karakterisere indholdet af arsen, calcium og jern i vandet på opløst og partikulær form for vand ved 3 forskellige pH-værdier.

Speciering af arsen ved pH = 9,47 var problematisk, da den anvendte adsorbent for analytisk separation af  $\text{As}^{\text{III}}$  og  $\text{As}^{\text{V}}$  ikke var tilstrækkelig selektiv ved høj pH (> pH 9), og resultatet var derfor behæftet med usikkerhed.

Overordnet set var der ingen arsen fjernelse i pelletreaktoren (< 0,3  $\mu\text{g/L}$ ) ved varierende pH (Tabel 7), og disse resultater understøtter derfor resultaterne fra de ovennævnte analyser, hvor der heller ikke var nogen fjernelse af arsen (Figur 10).

Til gengæld blev sammensætningen af opløst arsen ændret fra indløb til udløb, fra at indeholde mere arsen<sup>III</sup> til at indeholde mere arsen<sup>V</sup>, som er den mindre toksiske form af de to.

Eftersom arsen ikke blev fjernet under blødgøring, er det vigtigt at være opmærksom på, hvorvidt der er jern og mangan nok i vandet fra blødgøringen til, at arsen tilbageholdes i sandfilteret.

**Tabel 7** Analysedata for arsen fjernelse i pelletreaktoren, med speciering af opløste og faste stoffer (appendiks 8).

		Før pelletreaktor				Efter pelletreaktor			
		Partikulært	Opløst	opløst $\text{As}^{\text{V}}$	opløst $\text{As}^{\text{III}}$	Partikulært	Opløst	opløst $\text{As}^{\text{V}}$	Opløst $\text{As}^{\text{III}}$
pH ud = 8,18	Calcium (mg/l)	< 0,1	88,1			< 0,1	29,4		
	Arsen ( $\mu\text{g/l}$ )	0,2	6,6	0,2	6,4	0,5	6,0	0,8	5,2
	Jern (mg/l)	0,21	0,4			0,28	0,0		
pH ud = 8,94	Calcium (mg/l)	< 0,1	88,7			< 0,1	18,0		
	Arsen ( $\mu\text{g/l}$ )	0,2	6,5	0,1	6,4	0,5	6,2	1,2	5,0
	Jern (mg/l)	0,19	0,4			0,30	0,0		
pH ud = 9,47	Calcium (mg/l)	0,2	88,1			< 0,1	10,6		
	Arsen ( $\mu\text{g/l}$ )	0,4	6,5	0,4	6,1	< 0,1	6,5	1,4	5,1
	Jern (mg/l)	0,21	0,3			0,29	0,0		

### 7.5 Pesticid (BAM)

Det blev undersøgt om pelletreaktoren kunne fungere som barriere for organiske mikroforureninger såsom pesticider. Ved at lede BAM-holdigt råvand igennem pelletreaktoren, var det tydeligt, at pelletreaktoren ikke reducerede koncentrationen af dette stof i vandfasen (Tabel 8). Tværtimod stiger koncentrationen hvilket må tilskrives måleusikkerhed ved disse lave koncentrationer.

**Tabel 8** Fjernelse af pesticidet BAM i pelletreaktoren

	Før pelletreaktor [µg/l]	Efter pelletreaktor [µg/l]
Prøve 1	0,10	0,14
Prøve 2	0,12	0,13
Prøve 3	0,12	0,18
Gennemsnit og standardafvigelse	0,11 ± 0,01	0,15 ± 0,02

# 8. Pellets

For at afdække muligheden for at benytte pellets som jordforbedringsmiddel i stedet for at bortskaffe dem, undersøgte vi udviklingen og indhold af udvalgte grundstoffer i kalkpellets, biproduktet af blødgøringsprocessen. Dette var især med fokus på aflejring af tungmetaller i pellets.

Siden de første forsøg med blødgøring på Brøndbyvester vandværk, har Center for Kontrol under NaturErhvervstyrelsen opstillet fremtidige grænseværdier for tungmetaller i pellets (Tabel 9).

**Tabel 9** Grænseværdier for indhold af tungmetaller i pellets ved brug som jordforbedringsmiddel.

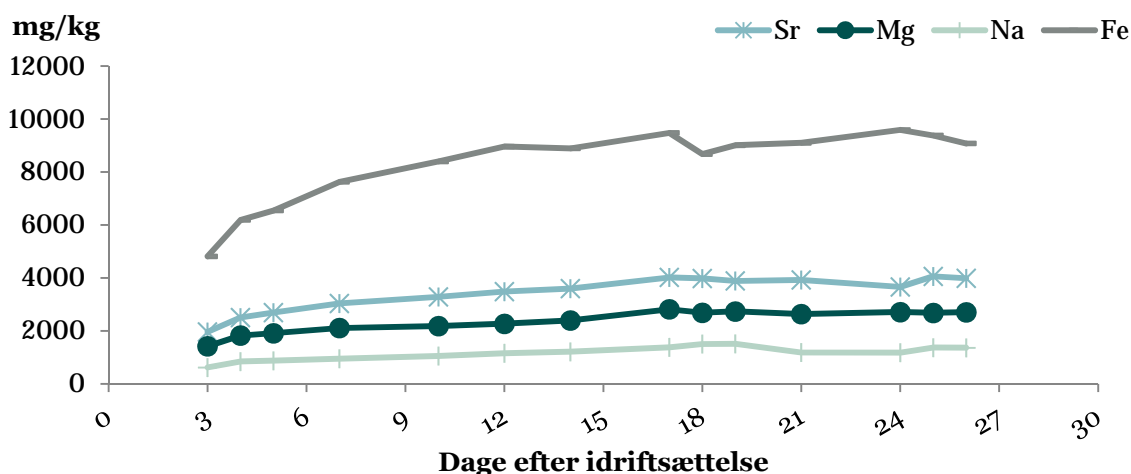
Tungmetal	Grænseværdi [mg/kg TS]
Cd	3
Cr(VI)	2
Hg	2
Ni	120
Pb	150
As	60

## 8.1 Udvikling over tid

For at vurdere, hvorvidt pellets kan bruges som jordforbedringsmiddel, er det nødvendigt at bestemme pelletsammensætning ved en stabil produktion af pellets.

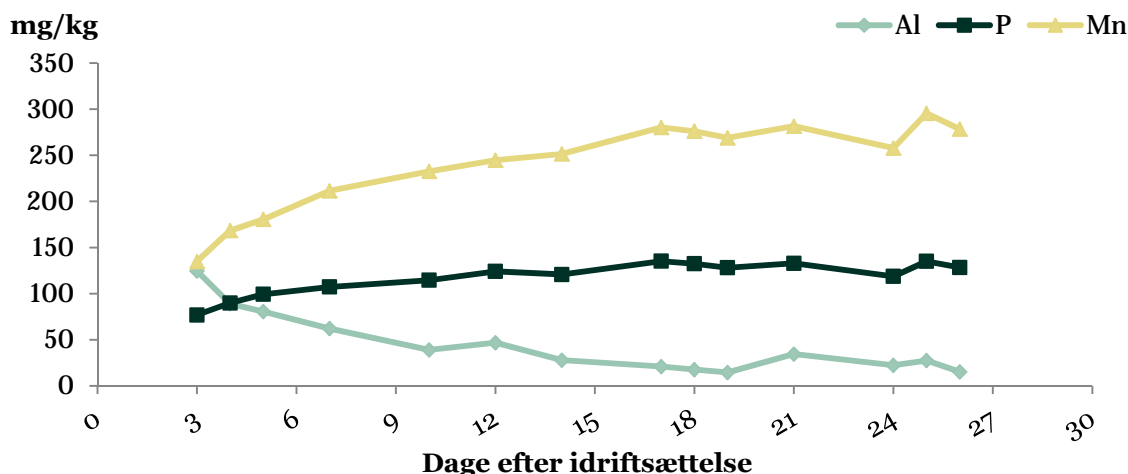
Ud fra en teoretisk beregning af krystallisering af calciumcarbonat på sandkorn i en pelletreaktor vil det tage ca. 10 dage før pellets i pelletreaktoren når en størrelsen på ca. 1-1,5 mm (hvor de tappes), med et vandflow på 600 l/t og en fjernelse af ca. 13 °dH (van Dijk, 2007).

På Værket ved Sønder sø blev det nærmere undersøgt, hvornår pelletsammensætningen var stabil efter idriftsættelse af pelletreaktoren, og det var den ca. 17 dage efter idriftsættelse for udvalgte metaller (Figur 12 og 13).



**Figur 12** Udviklingen fra opstart af strontium, magnesium, natrium og jern i tappede pellets fra pelletreaktoren opstillet på Værket ved Sønder sø (angivet i mg/kg).





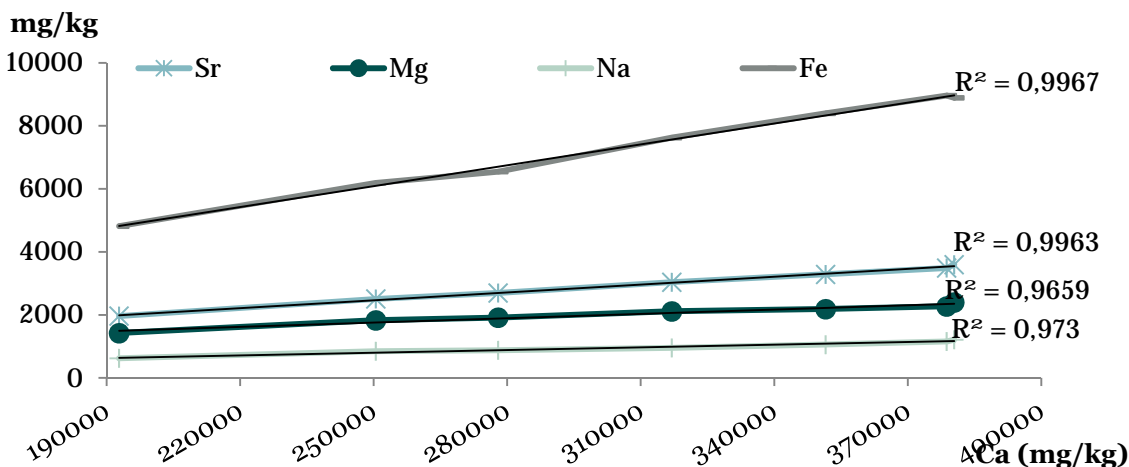
**Figur 13** Udvikling fra opstart af pelletreaktoren af aluminium, fosfor og mangan i tappede pellets fra pelletreaktoren opstillet på Værket ved Sønder sø (angivet i mg/kg).

Andre metaller, fx kobber, arsen, cadmium, tin, thallium, bly og kalium var ikke målbare og krom, kobolt, nikkel, og zink blev målt i så lave koncentrationer, at de ikke udviste samme stabilitet, som de afbildede metaller på Figur 12 og 13.

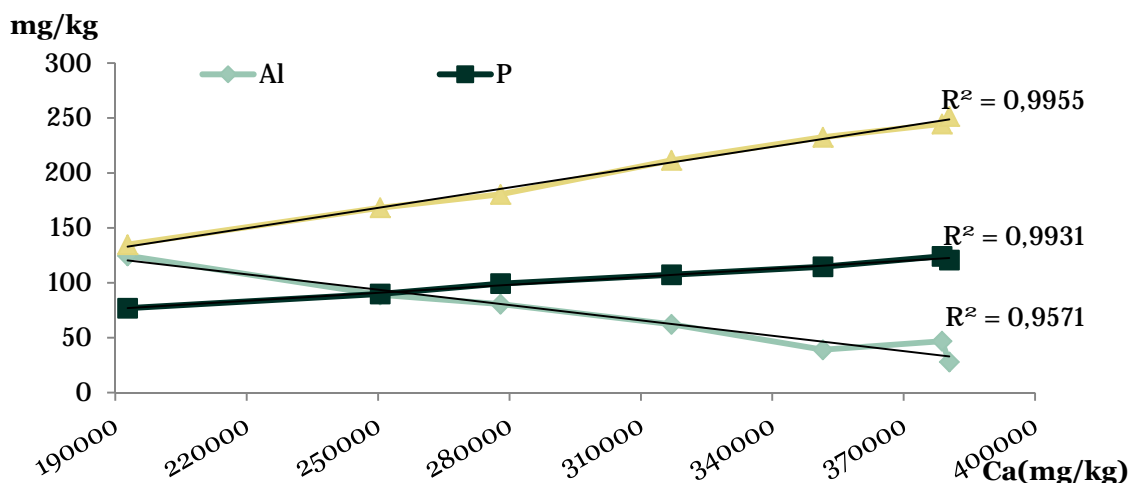
Ved afvejning af pellets blev sandkornet medregnet, og det blev derfor undersøgt, hvor stor en andel af pelletmassen, som sandkornet udgjorde. I en tilfældigt udvalgt batch af pellets fra Brøndbyvester vandværk, råvand, udgjorde sand 3,0 % af pelletmassen.

Eftersom sandkornet udgør en større procentvis andel af pelletmassen lige efter opstart, i modsætning til, når pellets er klar til at tappes, blev koncentrationen af metallerne (Figur 12 og 13) plottet mod koncentrationsudviklingen af calcium i pellets. Herved afbildes sammenhængen mellem calciumaflejring i pellets og aflejring af andre metaller uafhængig af sandkornets relative størrelse (Figur 14 og 15).

Resultatet viste, at når calciumaflejring i pellets voksede, så voksede koncentrationen af strontium, magnesium, natrium, jern, fosfor og mangan også i pellets. Det modsatte gjorde sig gældende for aluminium (Figur 14 og 15).



**Figur 14** Udvikling fra opstart af pelletreaktoren af strontium, magnesium, natrium og jern plottet mod udviklingen af calcium i tappede pellets fra pelletreaktoren opstillet på Værket ved Sønder sø (angivet i mg/kg).



**Figur 15** Udvikling fra opstart af pelletreaktoren af strontium, magnesium, natrium og jern plottet mod udviklingen af calcium i tappede pellets fra pelletreaktoren opstillet på Værket ved Søndersø (angivet i mg/kg).

Der var tydelig sammenhæng mellem aflejring af calcium i pellets og de udvalgte metaller ( $R^2 > 0,957$ ) frem til 14-17 døgn efter idriftsættelse af pelletreaktoren. Efter 17 døgn var der ingen umiddelbar udvikling i aflejring af calcium og den generelle sammensætning af pellets for udvalgte metaller, og variationen af koncentrationen i pellets, udtaget de sidste ti dage (dag 17-26), var lav (<10 % relativ standard afvigelse), bortset fra aluminium (Tabel 10).

**Tabel 10** Gennemsnitskoncentration for de sidste syv prøver (dag 17 til 26 efter opstart). De ti grundstoffer der var kvantificerbare på alle prøvedage er præsenteret.

	Ca	Fe	Sr	Mg	Na	Mn	P	Al
<b>Gennemsnit [mg/kg]</b>	395133	9186	3932	2712	1358	277	130	22
<b>Standard afvigelse [mg/kg]</b>	10707	292	123	52	124	11	5	7
<b>Relativ standard afvigelse</b>	3%	3%	3%	2%	9%	4%	4%	30%

På baggrund af forsøget fra Værket ved Søndersø konkluderes det, at pellets opnåede en stabil størrelse og sammensætning af metaller efter ca. 17 dage.

Pellets fra Brøndbyvester vandværk, Værket ved Regnemark, Dalumværket og Lindvedværket blev ikke udtaget lige så ofte som på Værket ved Søndersø. På Dalumværket blev pellets fra blødgøring af råvand udtaget første gang 45 dage efter opstart af pelletreaktoren, og sammensætning af metaller i pellets var stabil igennem hele den efterfølgende forsøgsperiode. Det samme var tilfældet på Brøndbyvester vandværk hvor de første prøver blev udtaget 6 døgn efter idriftsættelse. For behandling af vand fra værket ved Regnemark og på Dalumværket, hvor rent vand blev behandlet, blev stabilitet i sammensætningen af de større makroioner observeret mellem 9 og 14 døgn efter idriftsættelse, og med lidt større udsving i sammensætningen af flere spormetaller.

Det er derfor nødvendigt at køre pelletreaktoren i et stykke tid, før det kan antages at sammensætningen af udtagne pellets er stabil, og kan give et reelt grundlag for at vurdere kvaliteten af pellets under etableret drift.

## 8.2 Indhold af pellets

Oplukning af pellets, udtaget undervejs i blødgøringsforsøget, resulterede i målbare koncentrationer for størstedelen af metallerne.

Totaloplukning af pellets blev foretaget i triplikater, mens pellet-udtagning varierede fra én udtagning på Brøndbyvester vandværk, for færdigbehandlet drikkevand, til 14 udtagninger på Værket ved Søndersø. I Tabel 11 er der angivet et gennemsnit af koncentrationen i pellets for samtlige metaller, for hvert af de fire vandværker efter sammensætningen var stabil.

**Tabel 11** Indholdet af 20 metaller i pellets, målt i mg/kg, efter blødgøring af råvand og færdigbehandlet vand fra fire vandværker. Gennemsnittet er fundet for de analyser, hvor der har været observeret stabilitet i koncentrationen af metaller. Arsen blev ikke målt i vandet fra Brøndbyvester, Værket ved Søndersø og Værket ved Regnemark. <MDL angiver koncentrationer under detektionsgrænsen for måleapparat. IM = Ikke målt.

Vandtype	Brøndbyv. råvand	Brøndbyv. rent vand	Søndersø råvand	Regnemark rent vand	Dalum råvand	Dalum rent vand	Lindved råvand
Antal døgn efter idriftsættelse	6 døgn	2 døgn <sup>1</sup>	17 døgn	9 døgn	45 døgn	14 døgn	7 døgn <sup>2</sup>
Ca	378.000,00	403.000,00	393.000,00	395.000,00	395.000,00	399.000,00	312.000,00
Mg	4.220,00	4.740,00	4.060,00	2.710,00	3.580,00	3.630,00	3.250,00
Na	1.710,00	1.560,00	1.350,00	1.360,00	1.570,00	1.430,00	871,00
Fe	3.930,00	19,30	23,90	9.190,00	2.220,00	25,10	1.540,00
Mn	83,90	3,07	0,50	277,00	984,00	1,05	520,00
P	179,00	148,00	117,00	1,00	155,00	<MDL	60,10
K	102,00	101,00	<MDL	152,00	108,00	126,00	<MDL
Li	<MDL	<MDL	<MDL	<MDL	1,61	1,39	1,24
Al	<MDL	<MDL	<MDL	21,90	27,90	20,30	33,10
Cr	0,31	<MDL	<MDL	0,19	1,15	1,32	<MDL
Co	10,60	0,50	0,06	0,38	0,77	0,62	0,49
Ni	35,90	14,40	0,91	0,50	3,72	4,39	2,66
Cu	0,54	<MDL	0,45	<MDL	0,32	5,44	0,56
Zn	63,40	126,00	114,00	14,10	<MDL	30,80	15,10
Sr	4.130,00	690,00	8.190,00	3.930,00	1.590,00	1.610,00	2.670,00
Cd	<MDL	<MDL	<MDL	<MDL	<MDL	0,01	0,02
Sn	0,20	0,20	1,14	<MDL	<MDL	<MDL	<MDL
Tl	0,08	0,06	0,05	0,26	<MDL	<MDL	<MDL
Pb	0,67	0,36	1,43	<MDL	0,13	0,18	0,16
As	IM	IM	IM	IM	0,14	0,32	1,02

<sup>1</sup> Pellets blev kun udtaget og analyseret én gang og det kan derfor ikke vurderes om sammensætningen er stabil.

<sup>2</sup> Der blev ikke opnået stabile koncentrationer af grundstoffer i pellets fra Lindvedværket pga. problemer med kolonnen (Appendiks 6).

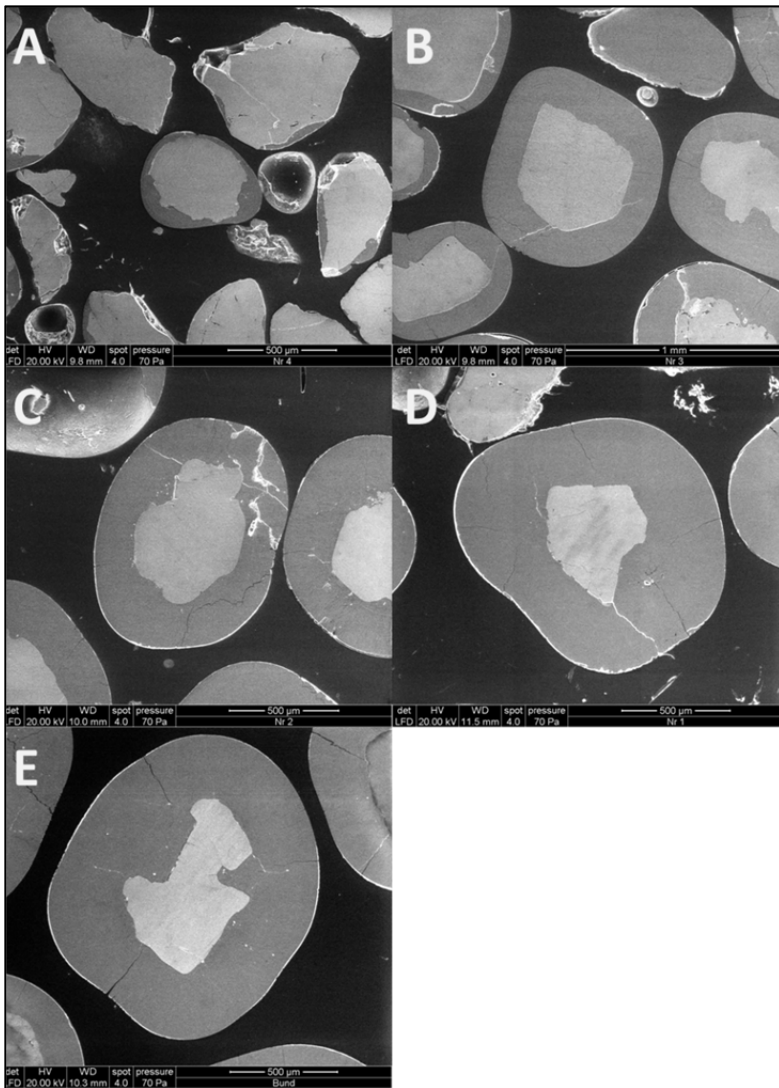
For grundstoffer målt i meget lave koncentrationer i indløbsvandet, blev der ikke altid registreret en ændring i koncentrationen fra indløbsvandet til udløbsvandet fra pelletreaktoren, fx blev fosfor kun detekteret i vandet på Værket ved Søndersø og Dalumværket. Til gengæld blev disse grundstoffer ofte påvist i pellets, og analysen af pellet giver derfor et reelt billede af, hvilke metaller der akkumuleredes i pellets over tid og derved fjernes ved blødgøring.

I henhold til Center for Kontrolls fremtidige grænseværdier for tungmetaller i pellets viser målingerne for pellets fra de fire vandværker, at grænseværdierne for de fire af seks analyserede grundstoffer, Cd, Ni, Pb og As overholdes (Tabel 9 og 11). Yderligere er koncentrationen af Cr under grænseværdien for Cr(VI) og denne parameter må derfor også siges at være opfyldt. Der blev ikke analyseret for Hg.

### 8.3 SEM af pellets

Når calciumcarbonat og andre metaller udfældes i pellets, bliver de større og tungere og vil som resultat heraf falde ned mod bunden af reaktoren. Denne proces kan vises ved hjælp af SEM-billeder (Scanning Electron Microscopy) af slebne pellets ved forskellige dybder. Pellets fra følgende dybder i pelletreaktoren opsat på Dalumværket blev afbildet: 1 m, 3 m, 4 m og 5 m under pelletstanden og fra 5,7 m, 10 cm over bunden af pelletreaktoren.

SEM-billederne viser tydeligt, hvordan aflejringen voksede ved voksende vanddybde i pelletreaktoren (Figur 16) og afspejler dermed processen, hvormed større og tungere pellets kun kunne holdes i suspension i den nedre del af reaktoren som følge af øget vægt.



**Figur 16** Pellets udtaget d. 18. maj 2015 ved forskellige dybder fra pelletreaktoren opsat på Dalumværket. Et hvidt sandkorn i midten omgivet af voksende aflejringer over dybden. A) 1 m under pelletstand, B) 3 m under pelletstand, C) 4 m under pelletstand, D) 5 m under pelletstand E) 10 cm over bunden - 5,7 m under pelletstand. SEM billeder lavet af Ebba Cederberg Schnell, DTU Byg 2015.

# 9. Alternative blødgøringsmetoder

Formålet med projektet "Alternative behandlingsmetoder" var at sammenligne forskellige metoder til at blødgøre brugsvand og deres indvirkning på kalkaflejringer i varmtvandsbeholdere (se appendiks 5).

Fire parallelle og ens forsøgslinjer blev anvendt (Figur 17) og vand fra følgende kilder blev pumpet igennem varmtvandsbeholdere:

1. Vand fra pelletreaktoren etableret på Dalumværket. Denne proces blev både anvendt på anaerobt grundvand fra Dalumværkets råvandsledning, samt på færdigbehandlet drikkevand fra Dalumværket.
2. Drikkevand uden forbehandling fra ledning leveret fra Dalumværket.
3. Vand behandlet af ultralydsaggregat placeret på ledning for produceret drikkevand fra Dalumværket.
4. Vand behandlet af elektrisk-feltaggregat placeret på ledning for produceret drikkevand fra Dalumværket.



**Figur 17** Opstilling af fire parallelle forsøgslinjer på Dalumværket.

Efter endt forsøg, blev vandvarmerne gennemskyllet med en svag syre, der efterfølgende blev analyseret for calciumindhold, for at kvantificere mængden af kalk aflejret inde i selve vandvarmeren.

Forsøget viste, at ultralydsbehandlet vand og vand behandlet med elektrisk felt ikke udviste nogen teknisk eller økonomisk signifikant forskel i kalkudfældning sammenlignet med ubehandlet vand. Resultaterne fra forsøget med vand blødgjort ved pelletmetoden viste derimod en reduktion af kalkudfældning i varmtvandsbeholderen på mere end 99 %

Det konkluderes derfor, at drikkevand blødgjort med pelletmetoden er den bedste metode af de afprøvede til at blødgøre vand til brug i vandvarmere.

# 10. Blødgøring som hygiejnisk barriere

For at undersøge, hvorvidt blødgøringsprocessen, hvor der tilsættes en stærk base, havde en funktion som hygiejnisk barriere ved en evt. mikrobiel forurening, blev der udført to forsøg på Lindvedværket. I det første forsøg blev det undersøgt, hvorvidt pelletreaktoren effektivt dræber bakterier ved fire forskellige koncentrationer, og i den anden del blev det undersøgt, om kontakttiden i pelletreaktoren påvirkede fjernelsen af bakterier (Figur 18) (appendiks 7).

Undersøgelsen af blødgøringsprocessen som en hygiejnisk barriere ved en potentiel forurening ledte til følgende konklusioner;

- Koncentrationen af de undersøgte mikroorganismer blev alle reduceret i blødgøringsprocessen fra ingen til 81 % Der er således en fjernelse, men reduktionen var ikke stor nok til, at pelletreaktoren udgør en væsentlig hygiejnisk barriere for potentielle forureninger.
- Ingen af de specifikt undersøgte mikroorganismer var særligt sensitive overfor behandlingen i blødgøringsprocessen og reduktionen var i samme størrelsesorden som for den generelle fjernelse af bakterier, målt som ATP og DAPI fjernelse. Dette tyder på, at fjernelsen skyldes uspecifikke mekanismer såsom udfældning med kalk.
- Mikroorganismene blev fjernet i selve pelletreaktoren, og neutraliseringen med kulsyre bidrog ikke til nogen yderligere reduktion.
- Fjernelsestendensen var den samme i de to forsøg, og fjernelsen af *Enterococci* var ens ved to forskellige koncentrationsniveauer.
- Der var ingen tydelig effekt ved at ændre vandets kontakttid i pelletreaktoren fra 7,7 til 13,5 minutter.



**Figur 18** Forsøg med blødgøring som hygiejnisk barriere på Lindvedværket.

# 11. Design af fuldskala-anlæg

Et delmål med projektet "Blødgøring af drikkevand" var at bygge et pilotanlæg og undersøge dets funktionalitet, med henblik på at dimensionere fremtidige blødgøringsanlæg på danske vandværker. Ved at opstille pilotanlægget ved fire forskellige vandværker i Danmark, blev der indsamlet data for opsætning og drift af anlægget, og disse erfaringer er opsamlet og konkretiseret i dette afsnit.

## 11.1 Sand

Forsøg med anlægget viste, at det er vigtigt at benytte den rette type sand. På Lindvedværket var der problemer med længere nedetider på grund af lille sandkornstørrelse og et meget stort indhold af fines. Det er derfor vigtigt at benytte sand af den rette størrelse (~0,3 mm) og at si eller vaske sandet før tilsætning, så det er velsorteret, for at reducere skylletiden og for at fjerne det fine støv, der kan ende i og blokere sandfilteret. Vaskeprocessen er imidlertid vanskelig, og bør foretages i en dertil designet vasker og ikke i selve pelletreaktoren. Det kan undersøges, hvorvidt brugen af en anden type sand end kvartssand, med en højere densitet, kan eliminere problemerne med sandstøv. Yderligere kan brugen af knust kalk, i stedet for sand, vurderes nærmere i forlængelse af et nyere hollandsk studie, som indikerer miljømæssige og økonomiske fordele ved kalk som pøde-materiale (Schetters et al., 2015).

I et fuldskala-anlæg vil sandet doseres automatisk efter desinficering og rensning for at fjerne fines. Store ændringer af pellethøjden ved aftapning af pellets og tilsætning af sand kan føre til midlertidig ubalance i blødgøringsprocessen, og ved at automatisere disse processer undgås disse ubalancer. På grund af skylning af sand var sandtilsætning den mest tidskrævende proces ved blødgøringen, og automatisering af processen vil derfor ydermere spare tid.

## 11.2 Pellets

Pellets i pelletreaktoren varierer meget i størrelse, men hvis pellets får lov til at blive for store, kan det føre til kollaps af pelletreaktoren. Driften af pelletreaktoren er derfor meget følsom overfor størrelsen af pellets, og det anbefales at tappe pellets, når de største pellets har nået en størrelse på ca. 1-1,5 mm. Ved at overvåge pellet-størrelsen omhyggeligt og automatisk sikre, at pellets opnår den rette størrelse, optimeres driften.

## 11.3 NaOH

Erfaringer fra Holland viser, at dyserne til dosering af NaOH med jævne mellemrum stoppes til med kalk og skal tages op for at renses. I pilotanlægget var denne procedure besværliggjort af anlæggets opsætning, og der blev derfor anvendt en opskåret elastisk silikoneslange, hvor kalkudfældninger af sig selv kunne frigøres uden at tilstoppe slangen. Forsøgene på de fire vandværker viste, at udstømning fra slangen fungerede upåklageligt.

Det var dog ikke muligt at teste tilsætning af NaOH ind i pelletreaktoren, hvilket er en af de afgørende parametre for optimering af processen, og det er derfor vigtigt ved design af et fuldskala anlæg at undersøge de forskellige doseringsdyser i forhold til tilstopning og blanding af NaOH i pelletreaktoren.

#### **11.4 Drift af anlæg**

Der skal være tilstrækkeligt tryk på råvandstilførslen til pelletreaktoren for at kunne løfte pellets, men i tilfælde af overtryk vil det være fordelagtigt at installere en reduceringsventil på anlægget.

#### **11.5 Belægninger**

Kalkafsætning er en af de væsentlige driftsmæssige udfordringer i blødgøringsanlæg, der baseres på pelletmetoden. Det var derfor væsentligt at studere forskellige materials egenskaber i den forbindelse (appendiks 9).

Materialet PG 28 viste sig at være den mest interessante overflade at arbejde videre med, da denne belægning virkede meget modstandsdygtig over for kalkaflejringer. Der vil udføres langtidsforsøg med denne type coating i forbindelse med blødgøringsforsøg i Lejre.

#### **11.6 Rengøring af pelletreaktoren**

Rensning af pelletreaktoren ved hjælp af en svag/middelstærk syre som citronsyre blev undersøgt, da håndtering af citronsyre er mere skånsom for en fremtidig driftsmedarbejder, samt virker mindre korroderende på metaller som rustfrit stål og messing, end stærke syrer såsom saltsyre (appendiks 4). I pelletreaktoren sker den største kalkudfældning i de nederste 2 m, da pH her er >9. Det medfører, at det er her, den største mængde kalk udfældes på reaktoroverfladen.

Konklusionen fra forsøget på både Dalumværket og Lindvedværket var, at afrensning af kalkaflejringer på pelletreaktor med citronsyre var succesfuld, men afhængigt af driftsforhold og varighed, kan det være nødvendigt at vurdere den optimale dosering nærmere.

#### **11.7 Elementer som skal inkluderes i et fuldskala-anlæg**

I pilotanlægget mangler elementer, som vil være nødvendige at inkludere i et fuldskala-anlæg.

I et fuldskala-anlæg vil der være et sandlager og en opslemningstank, hvor sandet vaskes fri for støv, og et system til automatisk tilsætning af sand til pelletreaktoren. Derudover kan det være nødvendigt at tilsætte fx natriumhypoklorit for at desinficere sandet inden brug, og der skal derfor også være en tank til natriumhypoklorit.

Flere gange dagligt vil der være automatisk udtagning af kalkpellets fra pelletreaktoren, og disse pellets skal lagres i en beholder.

Bunden af pelletreaktoren vil være designet anderledes - vandet vil ledes ind i pelletreaktoren via dyser i bunden og natronlud vil tilsættes umiddelbart over dysebunden. Natronlud fortyndes med blødgjort vand (hårdhed mindre end 0,1 °dH), inden det fordeles i pelletreaktoren. Der skal derfor være et ionbytningsanlæg, samt et saltlager og en buffertank, til produktion og opbevaring af fortyndingsvand.

Hvis kuldioxid skal bruges til pH-justering af det blødgjorte vand, skal gassen opløses separat, inden det ledes til hovedvandstrømmen.

Det kan være nødvendigt at installere et genbrugsanlæg til vand fra skylning af sand, vand fra regenerering af ionbytteranlæg og vand fra afvanding af kalkpellets.

Der skal yderligere være et mindre rensningssystem med syre til fjernelse af kalkaflejringer i pelletreaktoren.



# 12. Konklusion

I løbet af projektperioden fra februar 2014 til december 2015 blev et pilotanlæg for central blødgøring af drikkevand opstillet ved fire forskellige vandværker i Danmark og afprøvet på syv forskellige vandtyper.

Pilotanlægget kunne uden problemer transporteres og installeres på vandværker rundt omkring i Danmark. Med pelletreaktormetoden var det muligt at blødgøre hårdt dansk grundvand, med op til 71 % og opnå vand, der klassificeres som enten blødt (5,6-7 °dH) til middelhårdt (8,2-9,5 °dH).

Blødgøring af hårdt indløbsvand var ydermere stabil ganske kort tid efter opstart, og det er derfor en metode, der kan tages i brug kort tid efter installation.

Forsøgene med pilotanlægget blev brugt til at indsamle viden og erfaringer om drift af anlægget, og fordele og ulemper ved opsætningen. Dette blev gjort for at optimere design af et fremtidigt fuldskala-anlæg.

Flere stoffer ønsker man ikke fjernet i blødgøringsprocessen, da de kan have positiv indvirkning på menneskers sundhed eller den efterfølgende vandbehandling, hvorimod andre er uønskede og derfor fordelagtige at fjerne.

Magnesium og lithium er metaller der har en positiv indvirkning på menneskers helbred. I alle fire vandværker blev hverken magnesium eller lithium fjernet fra vandet ved blødgøring. Kobber bidrager til at stimulere nitrifikation og ammoniumfjernelse i biologiske sandfiltre og skal derfor heller ikke fjernes ved blødgøring, hvilket heller ikke var tilfældet.

Der er en øvre grænse for indholdet af fluorid i drikkevand, da forhøjede koncentrationer kan forårsage dental- og skeletal fluorose. Samtidigt beskytter fluorid i begrænsede mængder mod huller i tænderne, og det er derfor ikke ønskeligt at fjerne fluorid fra vandet. Fjernelse af fluorid blev derfor undersøgt på Dalumværket og Lindvedværket og fluorid blev fjernet med henholdsvis 31 og 13 %, men den totale mængde, der blev fjernet fra vandet var den samme fra de to vandværker (0,056-0,072 mg/L).

Af grundstoffer, som ønskes fjernet, skal særligt nævnes nikkel og arsen. Nikkel blev i gennemsnit fjernet med 41 % uafhængigt af vandtype og indløbskoncentration. Arsen derimod, blev ikke fjernet i pelletreaktoren.

Jern og mangan blev ved behandling af anaerobt råvand reduceret med henholdsvis 69-91 % og 96-98 %, og blødgøring af anaerobt råvand på danske vandværker vil derfor radikalt ændre den traditionelle behandling af drikkevand. For vandværker med forekomster af fx arsen, som ikke fjernes ved blødgøring, er det vigtigt at være opmærksom på det reducerede indhold af jern og mangan og derved den reducerede evne til at tilbageholde tungmetaller som arsen.

Der blev yderligere lavet et forsøg med fjernelse af pesticidnedbrydningsproduktet BAM, og her havde blødgøring ingen indvirkning. Blødgøring som hygiejnisk barriere blev også undersøgt og generelt blev koncentrationen af undersøgte mikroorganismer reduceret i blødgøringsprocessen, men ikke nok til, at pelletreaktoren udgjorde en væsentlig hygiejnisk barriere for potentielle forureninger.

Pellets fra pelletreaktoren blev undersøgt for indhold af aflejrrede metaller, for at afdække muligheden for at benytte pellets som biprodukt som fx jordforbedringsmiddel, i stedet for at klassificere pellets som affaldsprodukt. Dette var især med fokus på aflejring af tungmetallerne cadmium, krom, nikkel, bly og arsen i pellets. Resultaterne viste, at indholdet af nævnte tungmetaller i pellets fra de fire vandværker alle overholdt de fremtidige grænseværdier opstillet af Center for Kontrol,

NaturErhvervstyrelsen. Pellets udfældede på intet tidspunkt i flager. Koncentrationen af jern i vandet fra de fire vandværker var på intet tidspunkt over 3 mg Fe/L sådan som angivet at være problematisk i Holland, og det er derfor ikke muligt at udelukke risikoen for flagedannelse ved pelletreaktormetoden.

På Lindvedværket var der problemer med længere nedetider på grund af lille sandkornstørrelse og et meget stort indhold af fines, hvilket resulterede i, at pelletreaktoren skulle køres ved lavt flow. Det anbefales derfor at benytte velsorteret sand af den rette størrelse (~0,3 mm) og at si eller vaske sandet før tilsætning, for at reducere skylletiden ved opstart og for at fjerne det fine støv, der kan ende med at blokere sandfilteret.

Overfladematerialer blev undersøgt for deres egenskaber til at modstå kalkaflejringer og resultatet viste, at PG 28 var det mest interessante overflademateriale at arbejde videre med. Desuden blev det vurderet ved analyse, at afrensning af kalkaflejringer på pelletreaktoren kan udføres med citronsyre, men at den eksakte dosering bør vurderes yderligere.

Alternative behandlingsmetoder så som behandling med ultralyd eller elektrisk felt blev også undersøgt, og der blev aflejret ligeså meget kalk i varmtvandsbeholderen for vand behandlet ved disse metoder som for ubehandlet drikkevand. Vand behandlet ved pelletreaktormetoden derimod, reducerede mængden af aflejret kalk med 99 %.

# 13. Perspektivering

## 13.1 Forretningsplan

Formålet med projektet har været at undersøge de tekniske forhold omkring blødgøringsprocessen og har således ikke haft et direkte kommercielt sigte.

## 13.2 Forretningsmuligheder

Som udløber af projektet er der i samarbejde med Krüger, HOFOR og VCS udført et projekt:

"Optimering af blødgøring". Dette projekt har afstedkommet en brugsmodebeskyttelse.

Efterfølgende projektet, har VCS anmeldt patent PA 2016 00105:

PELLET REACTOR SYSTEM CAPABLE OF USING NON-UNIFORM SEEDING MATERIAL AND A METHOD FOR SOFTENING WATER USING SUCH A PELLET REACTOR SYSTEM.

Dette patent vil non-profit stå til rådighed for danske virksomheder.

## 13.3 Formidlingsaktiviteter

Projektet har været formidlet en lang række gange ved konferencer i ind- og udland. Desuden er der lavet en animationsfilm om projektet [www.futurewatercity.com](http://www.futurewatercity.com)

Der er foretaget følgende formidlingsaktiviteter i forhold til WP5: Demonstrationsanlæg til blødgøring:

	Aktivitet
16. september	Udsendelse af PM fra Miljøstyrelsen
16. september	Udsendelse af fælles PM
17. september	Interview til Altinget
19. september	Aflevering af input til kort notits i 'Dansk Miljøteknologi'
20. september	Aflevering af kort notits til VTUFs klumme i DanskVANDs oktobernummer samt kort artikel på baggrund af Miljøstyrelsens PM
27. september	Aflevering af artikel til White paper om vandforsyning (Rethink Water)
1. november	Aflevering af input til artikel i VTUFs årsskrift
4. november	Aflevering af artikel til DanskVANDs decembernummer
7. november	Aflevering af input til emner på DANVAs Forsyningstræf hhv. 10. og 12. marts
21. november	Indlæg på generalforsamling i IWA danske nationalkomite
30. november	Aflevering af abstract til IWA Water, Energy and Climate Conference - Mexico, maj 2014
<b>2014</b>	

30. januar	Indlæg på Danish Water Research and Innovation Platform
10. og 12. marts	Indlæg på DANVAs forsyningstræf
13. marts	Indlæg på netværksmøde i Danish Water Technology Group
29. april	Præsentation af fyrtårnsprojektet på DWF temamøde hos GEUS
5. – 9. maj	Præsentation af fyrtårnsprojektet på den danske pavillon ved IFAT messe i München
9. – 10. maj	<p>Artikler i Politiken vedr. blødgøring</p> <p><a href="http://politiken.dk/indland/ECE2285433/bloedt-vand-sparer-os-for-millioner/">http://politiken.dk/indland/ECE2285433/bloedt-vand-sparer-os-for-millioner/</a></p> <p><a href="http://politiken.dk/forbrugogliv/forbrug/ECE2283784/snart-kan-hovedstadens-vaskemaskiner-holde-5-aar-ekstra/">http://politiken.dk/forbrugogliv/forbrug/ECE2283784/snart-kan-hovedstadens-vaskemaskiner-holde-5-aar-ekstra/</a></p>
23. maj	<p>Artikel i Ingeniøren vedr. blødgøring</p> <p><a href="http://ing.dk/artikel/broendby-faar-landets-foerste-bloedgjorte-vand-168564">http://ing.dk/artikel/broendby-faar-landets-foerste-bloedgjorte-vand-168564</a></p>
2. – 4. juni	Præsentation af fyrtårnsprojektet på Nordisk Drikkevandskonference i Helsinki
11. september	Præsentation af fyrtårnsprojektet ved Fremtidens Vand konference i København
21. – 26. september	Præsentation af fyrtårnsprojektet ved IWA World Water Congress and Exhibition i Lissabon
18. – 19. november	Præsentation af fyrtårnsprojektet på DANVAs Dansk Vandkonference
<b>2015</b>	
3. – 6. november	Præsentation af Future Water produkter på den danske pavillon ved Aquatech i Amsterdam
17. – 18. november	Præsentation af fyrtårnsprojektet på DANVAs Dansk Vandkonference
18. december	Artikel i fagbladet Ingeniøren <a href="http://ing.dk/artikel/danmark-vil-saelge-vandteknologi-som-pakkelosninger-180832">http://ing.dk/artikel/danmark-vil-saelge-vandteknologi-som-pakkelosninger-180832</a> .

# Referencer

- GEUS, 2015. GEUS, Hårdhedskortet. <http://goo.gl/GgbpY1> (accessed 12.9.15).
- Kapusta, N.D., Mossaheb, N., Etzersdorfer, E., Hlavin, G., Thau, K., Willeit, M., Praschak-Rieder, N., Sonneck, G., Leithner-Dziubas, K., 2011. Lithium in drinking water and suicide mortality. *Br. J. Psychiatry* 198, 346–350. doi:10.1192/bjp.bp.110.091041
- Lennon, B.M.A., Whelton, H., Mullane, D.O., Ekstrand, J., 2004. Rolling Revision of the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. World Health Organization.
- Miljøministeriet, 2014. Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg BEK nr 948 af 22/08/2014.
- Naturstyrelsen, 2011. Central blødgøring af drikkevand.
- Schettters, M.J.A., Van Der Hoek, J.P., Kramer, O.J.I., Kors, L.J., Palmen, L.J., Hofs, B., Koppers, H., 2015. Circular economy in drinking water treatment: Reuse of ground pellets as seeding material in the pellet softening process. *Water Sci. Technol.* 71, 479–486. doi:10.2166/wst.2014.494
- van Dijk, J.C., 2007. Drinking water, Water treatment technology.
- Wagner, F.B., Nielsen, P.B., Boe-Hansen, R., Albrechtsen, H.-J., 2016. Copper deficiency can limit nitrification in biological rapid sand filters for drinking water production. Submitted to *Water Research*.
- WHO, 2011a. Hardness in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. World Health Organization.
- WHO, 2011b. WHO guidelines for drinking-water quality, 4th ed. World Health Organization. 38, 104–108. doi:10.1016/S1462-0758(00)00006-6
- Winther, L., Linde, J.J., Winther, H., 2010. Vandforsyningsteknik, 5th ed. Polyteknisk Forlag.



**Demonstrationsanlæg til blødgøring af drikkevand**  
Arbejdspakke 5 under Fyrtårnsprojekt "Fremtidens Drikkevandsforsyning"



Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K  
[www.mst.dk](http://www.mst.dk)